Reinhard Breuer
Chefredakteur

Der Teufel und das Weihwasser

Bei uns in der Redaktion diskutieren wir mindestens einmal im Monat (nämlich dann, wenn wir das nächste Heft »mischen«), was Sie diesmal am meisten interessieren könnte. Natürlich haben wir Anhaltspunkte – Ihre Leserbriefe oder unsere Online-Wunschartikelumfragen (die neueste Liste steht unter www.spektrum.de/wunschartikel zur Abstimmung bereit!). Auch befragen wir Sie regelmäßig nach Ihren Lieblingsthemen, und allein daraus ergibt sich eine klare Hierarchie, repräsentativ für unsere halbe Million Leser. Demnach liegen auf Platz 1 Astrophysik und Kosmologie, gefolgt von Physik, Biowissenschaften, Archäologie, Hirnforschung, Geologie und Klima; auf den hinteren Plätzen Computer, Mathematik, Chemie, Wissenschaftsgeschichte und Geisteswissenschaften. Diese Rangfolge bestimmt häufig den Heftinhalt. Sie deckt sich aber nicht durchweg mit meinen eigenen Interessen. Öfter als nach dieser Liste sähe ich gerne auch Artikel über Wissenschaftsgeschichte oder Geisteswissenschaften. Gerade Letztere treten in Spektrum eher selten auf. Die Ursache dafür sehen wir in der Redaktion im Mangel an geeigneten Themen. Aber was ist in der Geisteswissenschaft für uns ein »geeignetes Thema«? Schlagen Sie uns mal welche vor!

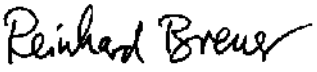
Soeben erschienen: unser Sonderheft über den Klimawandel – und was wir dagegen tun können

Aber diesmal kommt die Geschichte nicht zu kurz. Der Medizinhistoriker Manfred Vasold hat sich die Läuse vorgenommen, genauer: Kleiderläuse. Noch bis vor hundert Jahren übertrugen diese Verwandten der Kopfläuse das Epidemische Fleckfieber, das Millionen Menschen das Leben kostete (S. 24). Und die Suche nach einem neuen Massestandard nimmt zumindest Bezug auf das **Pariser Urkilogramm**, das letzte makroskopische Referenzobjekt für eine physikalische Einheit (S. 76). Diesen Artikel haben Sie übrigens in der letzten Wunschartikelrunde auf Platz 1 gewählt. Am besten gefallen mir natürlich Ihre Lieblingsthemen, Astrophysik und Kosmologie, zumal ich auf diesen Gebieten früher selbst wissenschaftlich gearbeitet habe. Und so ist es bestimmt kein Zufall, dass sich unsere Titelgeschichte diesmal mit einem Uraltproblem der Kosmologie beschäftigt – dem »singulären« Anfang von Raum und Zeit.

Das zu Grunde liegende mathematische Modell, bereits in den 1920er Jahren aus Einsteins Gleichungen abgeleitet und bis heute mit leichten Modifikationen in Gebrauch, leidet an einem grundsätzlichen Manko: Für den zeitlichen Nullpunkt postuliert es eine so genannte Singularität, ein Artefakt der Mathematik, aber physikalisch ein Unding; **denn die Physik scheut das Unendliche** – in diesem Fall einen Punkt unendlicher Massendichte und Raumkrümmung – wie der Teufel das Weihwasser.

Mit Hilfe der Schleifen-Quantengravitation, einem mit der Stringtheorie konkurrierenden Ansatz zur Vereinheitlichung aller Naturkräfte, haben nun einige junge deutsche Theoretiker den Versuch unternommen, ein Urknallmodell zu berechnen, das die unsinnige Singularität durch einen sicherlich dichten und heißen, aber jedenfalls endlichen Zustand ersetzt. Das eröffnet die Perspektive auf die Zeit »davor« – eine Art Durchbruch in ein anderes Universum, aus dem das unsrige hervorgegangen sein muss. Bisher sicherlich nur ein Modell mit all seinen Einschränkungen, aber auf jeden Fall ein seriöser Angriff auf ein »hartes« Problem (S. 32).

Herzlich Ihr



INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Wedeln mit Gefühl · Wochenendwetter · Super-Erde gesichtet u. a.

13 **Bild des Monats**
Das Rote Quadrat

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Asteroidenkollision löste Meteoritenhagel aus**
Trümmer eines Asteroidencrashs im Erdaltertum treffen bis heute die Erde

16 **Hurrikanen war es 2006 zu windig**
Nach der Rekordsaison von 2005 herrschte 2006 Flaute. Wieso?

20 **Blutiges Ende einer frühen Stadt**
Vor 5500 Jahren kam es zum ersten bekannten kriegerischen Akt

THEMEN

▶ **24** MEDIZINGESCHICHTE
Lausige Zeiten ade?

▶ **32** TITELTHEMA KOSMOLOGIE
Anfang ohne Urknall

44 KRAFTSTOFFE
Biodiesel der nächsten Generation

▶ **50** SINNESVERARBEITUNG
Wie das Gehirn die Welt wahrnimmt

▶ **58** OPTOELEKTRONIK
Die Zukunft der Plasmonik

68 MISSISSIPPI
Wie Nordamerikas längster Fluss entstand

76 METROLOGIE
Das Kilogramm – neu definiert

98 ESSAY
Der Strichpunkt-Krieg

SONDERTEIL

SciTechs 1/2007

Themen:
- ▶ Von der Idee zum Produkt
- ▶ Bessere Kraftwerke
- ▶ Das Internet als Mikroskop
- ▶ Chips für die Netzhaut
- ▶ Diamantenfieber
- ▶ Hightech-Strategien für Deutschland

NACH SEITE 48

SEITE 24

MEDIZINGESCHICHTE

Gefährliche Läuse

Noch im 19. und 20. Jahrhundert forderten Kleiderläuse in Europa Millionen Menschenleben – vor allem als Überträger des Epidemischen Fleckfiebers, das auch Hunger- oder Kriegstyphus heißt

SEITE 44

SERIE TEIL I: ERNEUERBARE ENERGIEN

Pack den Bio in den Tank

Kraftstoffe aus Energiepflanzen sind in – und schon müssen Urwälder lukrativen Monokulturen weichen. Neue chemische Verfahren könnten die Probleme lösen, denn sie wandeln selbst organische Abfälle in Biodiesel um

SEITE 50

HIRNFORSCHUNG

Die Sprache der Wahrnehmung

Studien am Tastsinn von Nagern enthüllen allgemeine Gesetze der Sinneswahrnehmung. Mit ihren Schnauzhaaren erfassen Ratten blitzschnell und hochgenau die Weite von Öffnungen

SEITE 68

GEOLOGIE

Der kuriose Ursprung des »Old Man River«

Ein heißer Fleck im Erdmantel, der heute unter den Bermuda-Inseln liegt, veranstaltete eine Berg- und Talfahrt mit dem Mississippi-Tiefland, als dieses über ihn hinwegzog. Erst so bekam der längste Fluss Nordamerikas freie Bahn

OPTOELEKTRONIK SEITE 58

Der Zauber der Plasmonik

Lichtwellen lassen sich trickreich in flächige Elektronenschwingungen übersetzen. Daraus könnte eine neue Generation superschneller Computerchips hervorgehen – und sogar ein unsichtbar machender »Zaubermantel«

TITELTHEMA KOSMOLOGIE SEITE 32

Welt ohne Anfang

Im Augenblick des Urknalls brechen klassische Modelle der Kosmologie zusammen. Mit neuen Ideen umgehen Physiker dieses Problem und machen den Ursprung des Kosmos zum Prüfstein der Quantengravitation

SEITE 76

WUNSCHARTIKEL: METROLOGIE

Neuer Massenstandard

Der Pariser Urkilogramm wird der modernen Technik nicht mehr gerecht. Forscher arbeiten an einem genaueren Standard, der sich auf eine unveränderliche Eigenschaft der Natur bezieht

SEITE 98

ESSAY

Programmiersprachen

Eigentlich sollten Computerfachleute doch sehr rational denkende Menschen sein. Da erstaunt es, wenn sie einen heiligen Krieg darüber führen, ob ein Programmtext mit einem Strichpunkt zu beenden ist oder nicht

KOMMENTAR

17 ANGEMERKT
Abenteuer im Welt-Raum

23 SPRINGERS EINWÜRFE
Johannas falsche Knochen

WISSENSCHAFT IM ...

49 **Rückblick:** Antibiotka gegen Rost · Tabakrauch zur Desinfektion · Der Tod kommt vormittags · Blitzbohner u. a.

42 **Alltag:** Fotografie – Wackeln erlaubt

REZENSIONEN

86 **Illusionen des Sehens**
von Thomas Ditzinger
Der Affe in uns von Frans de Waal
Besser leben, länger leben
von Christoph M. Bamberger
Das Säugetier von Gottes Gnaden
von Ulrich Lüke
Darwins Werk und Gottes Beitrag
von Christopher Schrader
Intelligent Life in the Universe
von Peter Ulmschneider

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

94 **Zähmung einer Widerspenstigen:** 100 Milliarden Polynome beschreiben die größte exzeptionelle Lie-Gruppe E_8

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Der Teufel und das Weihwasser

8 **Leserbriefe**

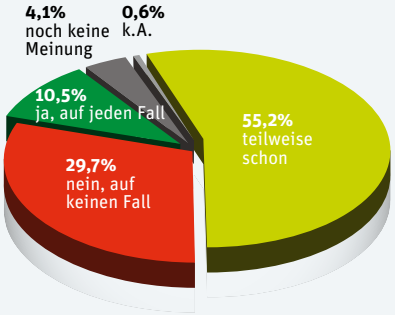
9 **Impressum**

92 **Preisrätsel**

106 **Vorschau**

Titelbild: Nasa (Hintergrund); Spektrum der Wissenschaft / Claus Schäfer (Bearbeitung)

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio



◀ LESERUMFRAGE I

Erinnerung total? Nicht total, aber . . .

Für uns etwas überraschend, spricht sich nur ein kleiner Teil der Umfrageteilnehmer explizit gegen die Digitalisierung des ganzen Lebens (Mai 2007, S. 84) aus. Unter den Leserbriefen (www.spektrum.de/artikel/869379) dominieren allerdings ablehnende Stimmen. Lesen Sie die vollständige Auswertung der Umfrage unter www.spektrum.de/artikel/871932

Das Ergebnis der dritten Runde:

Lego mit Molekülen
33,1 %

Baiae – schön, reich und verrucht
22,0 %

Dinosaurier-Massengrab auf Madagaskar
29,8 %

Ein gewichtiges Ding (s. S. 76)
47,6 %

Krebs bei Hunden
15,1 %

Da Mehrfachnennungen möglich waren, addieren sich die Prozentzahlen zu mehr als 100 %.

◀ LESERUMFRAGE II

Wunschartikel, die vierte Runde

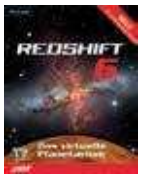
Zur Auswahl für das Septemberheft 2007 stehen diesmal folgende Themen:

- **Rückbau von Staudämmen** Aufblühende Ökosysteme – und neue Gefahren
- **Nanotubes im Netzverbund** Computermonitore zum Aufrollen und mehr
- **Geheimkontrolle für Gene** »Riboschalter« in der Boten-RNA können einen Genbefehl zurücknehmen – ein Ansatzpunkt für neue Antibiotika
- **Flüssige Teleskopspiegel** Eine preiswerte Alternative zu den Glasspiegeln, die mit zunehmender Größe immer teurer und unhandlicher werden
- **Äste am Stammbaum wachsen zusammen** Dass Eheleute gemeinsame Vorfahren haben, ist eher die Regel als die Ausnahme

Stimmen Sie ab unter www.spektrum.de/wunschartikel

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

	1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■
Gesamtpunktzahl	18



◀ REZENSION

Redshift 6. Das virtuelle Planetarium. 2 CD-Roms

Alles in allem ein sehr umfangreiches Programm mit einer schönen Himmelsdarstellung, aber auch gewissen Schwächen. Die Stärken liegen in der grafischen Darstellung – dem Bereich, den man sich instinktiv beim Wort Planetariumssoftware vorstellt – und den multimedialen Möglichkeiten moderner Unterhaltungsprogramme

Aus der Rezension von Lars Dittert

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Ganz oder gar nicht

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile – auch in der Wahrnehmungspsychologie. Was beispielsweise wie ein Sammelsurium von Flecken aussieht, kann plötzlich eine vertraute Form annehmen – in dem Moment, in dem das Gehirn »Gestalt« erzeugt

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

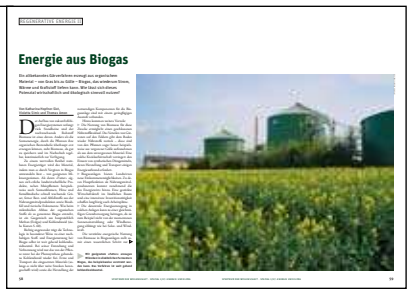
zu Themen
in diesem Heft

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 44

REGENERATIVE ENERGIE

Energie aus Biogas

Ein altbekanntes Gärverfahren erzeugt aus organischem Material Biogas, das wiederum Strom, Wärme und Kraftstoff liefern kann
Kostenlose Leseprobe unter
www.spektrum.de/artikel/870331



SDW SPEZIIAL 1/2007
Energie und Klima

Handbuch der Klimareparatur

Atomkraft – nein danke?

Energieeffizienz

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 32

KOSMOLOGIE

Neues von den Superstrings

Bald könnten Gravitationswellendetektoren und leistungsfähige Teilchenbeschleuniger eine erste experimentelle Überprüfung der Stringtheorie ermöglichen

SUW 3/2007
Dynamischer Mars

Pyramiden als Sternwegweiser?

Erdnahe Asteroiden

Rendezvouz mit Jupiter

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 50

TASTSINN

Gefühlte Welten

Die Erforschung des Tastsinns steckt noch in den Kinderschuhen – dabei verspricht sie spannende medizinische Einsichten

G&G DOSSIER 2/2004
Rätsel der Wahrnehmung

Die Welt als Fälschung

Denken auf asiatisch

Farben hören, Zahlen riechen

ZUM ARTIKEL AUF SEITE 68

NATURGESCHICHTE

Die schwere Geburt des Amazonas

Nach neuesten Erkenntnissen dauerte es Jahrmillionen, bis der Fluss sich seinen Weg quer durch Südamerika gebahnt hatte – was zugleich die Vielfalt seiner Flora und Fauna erklärt

SDW 10/2006
Gene für ein langes Leben

Was Fischen Beine machte

Monde auf der schiefen Bahn

Nanotechnologie

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-743

Reverse Engineering

Ostern kommt immer so plötzlich
April 2007

In Ihrem Beitrag über Rabbit Prototyping im Aprilheft blieb leider die langjährige Zusammenarbeit des Fraunhofer-Instituts für Mehl- und Süßspeisen (IMS) in Castrop-Rauxel mit unserem Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik in Fürth unerwähnt.

Ein formschöner Osterhase aus den 1950er Jahren sollte anlässlich eines 50-jährigen Firmenjubiläums neu aufgelegt werden. Natürlich existieren von dem Osterhasen keine CAD-Daten. Inzwischen wurden auch etliche undokumentierte Veränderungen durchgeführt.

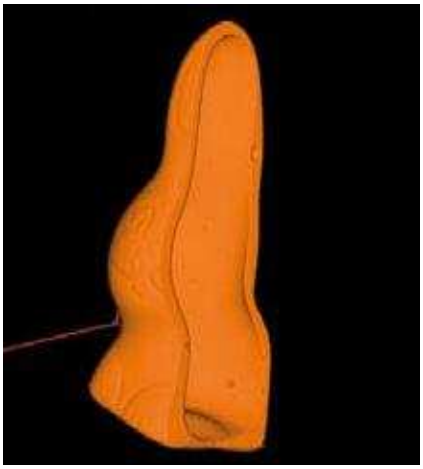
Mittels Computertomografie an einem noch vorhandenen Osterhasen und anschließender Flächenrückführung gelang es uns, CAD-Daten für ein Reverse Engineering zu gewinnen. Dabei konnten wir auch zahlreiche Poren nachweisen, was zu einer Änderung im Herstellungsverfahren geführt hat (siehe Bild unten).

Zu guter Letzt konnten wir durch eine zerstörungsfreie Analyse der Schokoladenwandstärke zu Gewichtseinsparungen ohne Stabilitätsverlust beitragen.

Die Prozesskette vom virtuellen CAD-Modell zum Bauteil ist Stand der Technik. Die umgekehrte Richtung, also die Konvertierung von CT-Messdaten nach CAD-Daten, bietet für die Produktentwicklung eine großes Potenzial, weist aber auch noch einen enormen Entwicklungsbedarf auf.

Dr. Stefan Kasperl, Fürth

STEFAN KASPERL



Mittels Computertomografie konnte die Hohlform für die Osterhasen aus den 1950er Jahren neu konstruiert werden.

Projekt »Studieren ab 16«

Statt Unterricht in die Vorlesung
Junge Wissenschaft, April 2007

Das von Dr. Halbritter initiierte Modell des Frühstudiums, das wir an der Technischen Universität Berlin als Projekt »Studieren ab 16« seit dem Wintersemester 2006/07 als Angebot für leistungsstarke Schülerinnen und Schüler in Berlin und Brandenburg in die Tat umgesetzt haben, fand ein erstaunliches Echo. Zum Wintersemester wurden 55 Schülerinnen und Schüler von ihren Schulen gemeldet, von denen etliche das Semester mit respektablen bis sehr guten Leistungen abschließen konnten. Das Interesse bei Schülern, Eltern, aber auch bei vielen Lehrern ist steigend.

Wir können die Wirksamkeit dieses Modells der Begabtenförderung nur bestätigen: Die Möglichkeit, die Schule zeitweilig mit dem Campus zu vertauschen, ist unter anderem eine Chance für Leistungsstarke und Hochbegabte, durch sinnvolle Herausforderungen der Karriere als »Underachiever« zu entgehen. Die zahlreichen Anmeldungen von zum Teil sehr jungen Schülern (»zwei Klassen übersprungen und schon langweilt sie sich wieder«) sprechen hier eine deutliche Sprache. Gute Schüler machten bisher in Berlin traditionsgemäß wenig Schlagzeilen und wurden von Politik und Presse eher stiefmütterlich behandelt, das Projekt »Studieren ab 16« ist da hoffentlich ein deutliches Signal in die andere Richtung!

Dr. Uta Dobrinkat-Otte, Berlin

Mehr Verwirrung als Klärung

Die Fortschrittsillusion, April 2007

Ist es wirklich so schwierig, das Konzept des Fortschritts in einem wissenschaftlichen Sinn zu objektivieren? Ich denke nicht. Qualitative und quantitative Ansätze sind sicherlich in der Ökonomie zu finden (siehe zum Beispiel Wohlstand und Armut der Nationen von David S. Landes). Ray Kurzweil (The Singularity is Near) hat Fortschrittspraxis auch in der Biologie gefunden. Wie weit solche Messgrößen dem intuitiven Verständnis von Fortschritt oder einer philosophischen Definition entsprechen, ist natürlich eine andere Frage.

Interessant ist, dass ein Philosoph Begriffe, die normalerweise in der Philosophie betrachtet und diskutiert werden (»Ich«, »Freier Wille«, …), nach naturwissenschaftlichen Kriterien prüft und für untauglich erklärt. Damit setzt er sich positiv ab von der postmodernen Relativierung der Naturwissenschaften als sozialem Konstrukt ohne Anspruch auf Objektivität.

In letzter Konsequenz weitergedacht führt die Argumentation zur Forderung, die Philosophie abzuschaffen, da dort mit schlecht definierten Begriffen und Konzepten jenseits naturwissenschaftlicher Rigidität gearbeitet wird und damit mehr Verwirrung als Klärung erreicht wird. Ob das im Sinne des Autors ist?

Markus Enz, Bettingen, Schweiz

Versagen gewünscht

Ein Flugzeug für den Weltraum
Februar 2007

Mein generelles Interesse für technische Themen hat meine Neugier auf diesen Beitrag geweckt. Nach der Lektüre bin ich ernüchtert: Ich habe den Eindruck gewonnen, dass der Autor diesen Artikel primär aus militärischer Sicht – US Luftwaffe et cetera – verfasst hat.

Betroffen gemacht hat mich die Formulierung »Natürlich würde der strukturelle Zusammenbruch eines militärischen Flugkörpers vor Erreichen seines Ziels völliges Versagen bedeuten«. Ich wünsche mir ein höchstmögliches Maß an Versagen militärischer Gerätschaften weltweit, gleichgültig wer diese betreibt, betreiben möchte oder gegen wen auch immer diese eingesetzt werden (sollen).

Hans-Günter Lütke Uphues, Altenberge

Roboter-Kriminalität

Roboter für jedermann, März 2007

Computer und Internet haben uns neue Formen der Kriminalität beschert. Zweifelsohne überwiegt der Nutzen dieser jungen Technologien den Schaden, den Straftäter unter Zuhilfenahme von PC und Internet anrichten.

Wie wird es in der schönen neuen Welt der Roboter aussehen? Wir sollten

Dieser Roboter könnte den Menschen dienen, aber auch sehr schaden.

nicht so naiv sein zu glauben, alle Roboter würden nach den drei edlen Gesetzen der Robotik (I. Asimov) programmiert. Lassen wir unsere Fantasie doch einmal kurz in schmutzigere Bahnen ziehen!

Roboter mit jenen Fähigkeiten, welche Bill Gates ankündigt, werden ganz neue Formen von Verbrechen ermöglichen. Während Computerkriminalität sich meist gegen das Eigentum ihrer Opfer richtet, wird Roboterkriminalität auch Leben und Gesundheit der Betroffenen beschädigen.

Nicht umsonst wird ein erheblicher Teil der einschlägigen Forschung aus militärischen Beweggründen initiiert! Die Frage, ob wir in 30 Jahren behaupten können, der Nutzen »intelligenter« Roboter sei größer als der mit ihrer Hilfe angerichtete Schaden, ist meiner Meinung nach offen.

Dirk Brixius, Ratingen

Schwefliger Meeresgeruch in Deutschland

Tod aus der Tiefe, März 2007

Die beschriebene H_2S-Emission durch ungewöhnliche Witterung ist durchaus auch in Deutschland erlebbar:

Aus meiner Studienzeit in Kiel kann ich mich an den Frühsommer 1983 erinnern, mit einer langen, extrem heißen und ruhigen Wetterlage in der Deutschen Bucht.

Ein schwefliger Meeresgeruch war bereits weit im Inland wahrzunehmen und einige Gebiete der Ostsee wurden für die Schifffahrt gesperrt.

Sicherlich ist es bemerkenswert, dass solche Phänomene auch direkt vor unserer Haustür passieren können.

Prof. Karsten Loehr, Ulm

Errata

Als Rechner noch geschoben wurden April 2007

Wenn Napier seine Logarithmentafeln erst 1614 veröffentlicht hat, werden sie Kepler bei der Findung seiner Gesetze zur Planetenbewegung kaum geholfen haben, denn die beiden ersten keplerschen Gesetze wurden bereits 1605 gefunden. Dagegen dürfte Kepler Zugriff auf die von Jost Bürgi erstellten Logarithmentafeln gehabt haben, da dieser ab 1604 ebenfalls in Prag wirkte und bereits seit 1588 an der Entwicklung der Logarithmen gearbeitet hatte.

Dipl.-Phys. Hermann-Michael Hahn, Köln

Eine kleine, aber verhängnisvolle Ungenauigkeit im ansonsten sehr hübschen Artikel: Im Kasten »Rechnen mit Logarithmen« auf S. 96 wird gesagt, dass in der Gleichung $a^x = m$ die Grösse a jede beliebige Zahl sein kann. Ich fürchte, dass mit dieser Feststellung der Nebel um die Logarithmen wieder dichter geworden ist. Wie dem entnebelten Menschen klar ist, darf a nicht gleich 1 sein.

Prof. Manfred Trümper, Uzès, Frankreich

Die Mathematik der doppelten Gerechtigkeit, April 2007

In der unteren Gleichung auf S. 80 (linke Spalte) wurden versehentlich zwei Terme vertauscht. Die richtige Gleichung lautet

$$\frac{x}{2976} \cdot \frac{x-3}{1025} = \frac{9-x}{1322} \cdot \frac{10-x}{2113}$$

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Bernhard Gerl, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Claus-Peter Sesín, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4536, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-45, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01.01.2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

MINERALOGIE

Riesenkristalle aus Gips

AG. FOCUS / SPL / MSF, JAVIER TRUEBA

Als Bergarbeiter vor sieben Jahren die feuchtheiße Höhle in der Naica-Mine unter der mexikanischen Wüste entdeckten, kamen sie sich vor wie im Märchenland: Riesige, bis zu elf Meter lange und fünfzig Tonnen schwere, weiß leuchtende Kristalle bildeten eine atemberaubende Kulisse. Bis heute blieb es ein Rätsel, wie sie entstanden sind. Nun glauben der Kristallograf Juan Manuel Garcia-Ruiz und seine Kollegen von der Universität Granada (Spanien) das Geheimnis gelüftet zu haben.

Demnach floss vor einigen Millionen Jahren heißes Grundwasser, erhitzt vom Magma eines erlöschenden unterirdischen Vulkans, durch die Gesteinsritzen und löste den Kalkstein auf. Dabei entstanden wassergefüllte Hohlräume. In diesen kristallisierte aus der kalziumhaltigen Lösung bei den hohen Temperaturen zunächst Anhydrit aus: die wasserfreie Form von Gips. Dann kühlte der Boden langsam ab und eine Phase begann, während der es in der Grotte über sehr lange Zeit konstant 54 Grad Celsius warm war.

Bei dieser Temperatur ist die Löslichkeit von Anhydrit geringfügig höher als die von Gips. Dadurch wandelte sich das wasserfreie in das wasserhaltige Mineral um – allerdings so langsam, dass nur schon vorhandene Gipskristalle weiterwuchsen und dabei riesige Ausmaße annahmen, aber praktisch keine neuen Keime entstanden. Im Zuge des Bergbaus senkte sich schließlich das Grundwasser, sodass die Höhle trockenfiel und heute begehbar ist.

Die »Cueva de los Cristales« im mexikanischen Bundesstaat Chihuahua liegt 290 Meter unter der Erde.

Geology, Bd. 35, Nr. 4, S. 327

KRYPTOLOGIE

Nonsens-Text aus dem Mittelalter

Anfang des 20. Jahrhunderts erhoben die Dadaisten den Nonsens zur Kunstform. Doch wie es scheint, hatte nicht erst bei ihnen der Unsinn Methode. Dafür sprechen gründliche Analysen, denen der Physiker Andreas Schinner von der Universität Linz nun eine mittelalterliche Pergamenthandschrift unterzog, die der US-Antiquar Wilfried Voynich 1912 in einem italienischen Jesuitenkolleg aufgestöbert hatte.

Sie enthält thematisch gruppierte Illustrationen von badenden, nackten Frauen, Tierkreiszeichen und Fantasiepflanzen mit begleitendem Text aus seltsamen Schriftzeichen in einer unbekannten Sprache. Jahrelang rätselten Wissenschaftler über den Inhalt; doch alle Entschlüsselungsversuche misslangen. Immerhin offenbarten statistische Analysen grundlegende Merkmale natürlichsprachiger Texte.

Schinners tiefer gehende Untersuchung deckte nun jedoch versteckte Regelmäßigkeiten auf, die auf einen sinnleeren, künstlich erzeugten Zeichensalat hindeuten. So nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wort oder Wortanfang noch einmal auftritt, mit der Entfernung im Text ab. Schon 2003 hatte Gordon Rugg von der Universität Keele (England) gezeigt, wie das »Voynich-Manuskript« rein mechanisch mit einem Schablonenverfahren erstellt worden sein könnte. Motiv war wohl, den sammelwütigen Kaiser Rudolf II. auszunehmen, der die Handschrift als vermeintliches Geheimwerk des englischen Naturforschers Roger Bacon teuer erwarb.

Cryptologia, Bd. 31, S. 95

Seite aus dem nun als Jux entlarvten »Voynich-Manuskript«

JONATHAN DILAS (FOLIO 33V – 34R)

Hund »Cooper« von Karsten Kramarczik, Art Director bei »Spektrum der Wissenschaft«, ist offensichtlich bester Laune.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

VERHALTEN

Wedeln mit Gefühl

Hundebesitzer sollten Giorgio Vallortigara von der Universität Triest dankbar sein; denn durch die Untersuchungen des italienischen Forschers und seiner Kollegen wissen sie endlich, was ihr vierbeiniger Freund ihnen schwanzwedelnd sagen will. Empfindet das Tier Freude, Frust oder Furcht? Die Richtung des Rutenschlagens verrät es – so die Erkenntnis der Wissenschaftler.

Das Team um Vallortigara präsentierte dreißig Hunden verschiedener Rassen jeweils entweder ihr Herrchen, eine fremde Person, eine Katze oder einen Angst einflößenden belgischen Schäferhund und zeichnete die Reaktion per Video auf. Dann analysierten die Forscher die Schwanzbewegung im Detail. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede: Beim Anblick von Mensch und Katze tendierten die Schwänze grundsätzlich nach rechts. Die heftigste Reaktion riefen Herrchen oder Frauchen hervor, während die fremde Person nur ein mittelstarkes Wedeln auslöste. Bei der Katze blieb der Schwanz dagegen fast ruhig – die Hunde könnten vor Aufregung das Wedeln schlicht vergessen haben, vermutet Vallortigara. Beim belgischen Schäferhund schließlich schlug die Rute überwiegend nach links aus.

Die Forscher erklären ihre Ergebnisse mit der Zweiteilung des Gehirns. Positive Gefühle aktivieren demnach die linke Hemisphäre, was Schwanzbewegungen nach rechts begünstigt. Für Furcht gilt das Umgekehrte.

Current Biology, Bd. 17, Nr. 6, S. R199

TECHNIK

Rotierender Öko-Wolkenkratzer

Der erste energieautarke Wolkenkratzer der Welt soll in Dubai, der Hauptstadt des gleichnamigen arabischen Emirats, entstehen. Der israelisch-italienische Architekt David Fisher stellte das Projekt Mitte April vor. Laut Entwurf werden die 68 Stockwerke des 313 Meter hohen, aus vorgefertigten Segmenten errichteten Gebäudes drehbar um eine starre Innenstruktur angeordnet, in der sich die Aufzüge, Treppen und andere Versorgungseinrichtungen befinden. Jede Etage kann unabhängig von den übrigen rotieren, sodass der Wolkenkratzer einen ständig wechselnden Anblick bietet.

In den untersten zwölf Stockwerken liefern Photovoltaikzellen Strom. Zwischen den oberen 58 Etagen werden dagegen eigens entwickelte Windräder installiert. Sie sind mit 800 000 Dollar pro Stück nur halb so teuer wie herkömmliche Modelle; außerdem können sie im Unterschied zu diesen auch bei heftigem, böigem Wind weiter betrieben werden. Alle Anlagen zusammen sollen einen Stromüberschuss von zwanzig Prozent erzeugen.

Der Projektleiter, das Mailänder Architektenbüro »Dynamic Architectural Club«, veranschlagt die Gesamtkosten auf etwa 330 Millionen Dollar. Baubeginn soll im Herbst dieses Jahres sein und die Bauzeit 22 Monate betragen. Zum Ingenieurteam gehört auch der inzwischen 79-jährige Leslie E. Robertson, der unter anderem das World Trade Center entworfen hat.

Noch ist es nur ein Modell: der umweltfreundliche, futuristische Wolkenkratzer, der zum Wahrzeichen Dubais werden soll.

MIT FRDL. GEN. VON ROTATING TOWER TECHNOLOGY INTERNATIONAL LTD. UND DAVID FISHER, ARCHITEKT

PALÄONTOLOGIE

Fliegende Eidechse aus der Kreidezeit

Durch die Lüfte segeln zu können scheint so vorteilhaft zu sein, dass bei allen großen Tierklassen – von den Fischen bis zu den Säugern – zumindest einzelne Vertreter im Verlauf der Evolution diese Fähigkeit erworben haben. Üblicherweise wurden dabei Extremitäten zu Tragflächen umgestaltet oder Flughäute zwischen ihnen ausgebildet. Eine höchst ungewöhnliche Methode verwenden dagegen die Flugdrachen in Südostasien: Sie bilden einen Gleitschirm mittels einer Membran, die zwischen ihren verlängerten Rippen aufgespannt ist.

Wie sich nun zeigte, ist auch diese kuriose Erfindung jedoch keineswegs einzigartig. Auf den gleichen Trick kamen unabhängig von den Flugdrachen schon vor rund 145 Millionen Jahren Verwandte der Eidechsen. Das entdeckten Wissenschaftler um Xing Xu von der Universität Shenyang (China). In Ablagerungen aus der frühen Kreidezeit stießen sie auf das fünfzehn

ZHAO CHUANG UND XING LIDA

Die urtümliche Eidechse beim Gleitflug

Zentimeter lange, fossile Skelett einer Echse mit überlangen Rippen. Zwischen diesen war, so die naheliegende Vermutung, ebenfalls eine Membran gespannt, die den Gleitflug ermöglichte. Das ausgestorbene Tier, das den Namen *Xianglong zhaoi* erhielt, und die Flugdrachen bieten damit ein besonders eindrucksvolles Beispiel einer konvergenten Evolution.

Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 104, Nr. 13, S. 5507

PLANETOLOGIE

Super-Erde gesichtet

Nun, da uns der Klimakollaps droht und laut »Bild« die Erde stirbt, trifft es sich gut, dass Genfer Astronomen eine nur zwanzig Lichtjahre entfernte Ersatzheimat für die Menschheit entdeckt haben. Vor überstürzter Umsiedlungseuphorie sei jedoch gewarnt. Einerseits fragt sich, ob die Bewohner der neuen Super-Erde uns denn willkommen heißen. Andererseits steht keineswegs fest, dass dort so lebensfreundliche Bedingungen herrschen wie im ersten Überschwang vielfach angenommen.

Die vorliegenden Informationen fußen lediglich auf Messungen einer schwachen Taumelbewegung des Sterns »Gliese 581«.

KAREN WEHRSTEIN

Superromantisch – sieht so der Sonnenuntergang auf der neuen Super-Erde aus?

Dieser hat demzufolge einen Trabanten mit der fünffachen Masse der Erde, der ihn im mittleren Abstand von einem Vierzehntel des irdischen Bahnradius alle dreizehn Tage einmal umkreist. Da es sich bei Gliese 581 um einen Roten Zwerg handelt, der wesentlich kleiner und kühler als unsere Sonne ist, dürfte auf dem Planeten trotz der geringen Entfernung von seinem Mutterstern eine angenehme Durchschnittstemperatur zwischen 0 und 40 Grad Celsius herrschen.

Zudem sollte »Gliese 581c« – so der Name des Trabanten – wegen seiner geringen Masse ein Gesteinskörper und kein Gasplanet sein. In diesem Fall wäre er rund eineinhalbmal so groß wie die Erde. Falls sich Leben mit photosynthetischen Organismen darauf entwickelt hätte, gäbe es auch eine sauerstoffhaltige Atmosphäre. Für eine Übersiedlung müsste dann nur noch ein Warp-Antrieb mit Überlichtgeschwindigkeit entwickelt werden, damit die Reise nicht zu lange dauert.

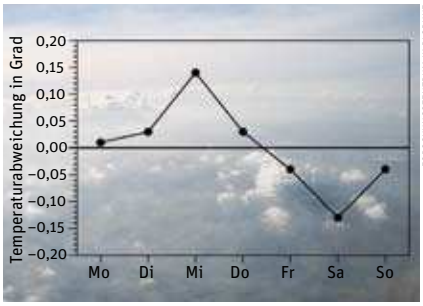
Eso-Pressemitteilung vom 25. 4. 2007

METEOROLOGIE

Nasskalte Wochenenden

Bisher war es nur ein Verdacht, doch nun kommt die wissenschaftliche Bestätigung: Am Wochenende ist das Wetter gewöhnlich schlechter als an Werktagen. Aber niemand darf sich darüber beklagen; denn schuld sind wir Menschen selbst.

Die Meteorologen Dominique Bäumer und Bernhard Vogel von der Universität und dem Forschungszentrum Karlsruhe haben Daten von zwölf Stationen des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 1991 bis 2005 ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass der Mittwoch gewöhnlich der wärmste, der Samstag dagegen der kühlste Tag in der Woche ist – seine Temperatur liegt durchschnittlich 0,2 Grad Celsius unter dem Mittwochswert. Zudem regnet es sonnabends am meisten, nämlich fünfzehn Prozent mehr



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Im langjährigen Durchschnitt ist es in Deutschland mittwochs deutlich wärmer als samstags.

und zehn Prozent häufiger als am Montag, dem trockensten Wochentag. Von Anfang zum Ende der Woche hin nimmt die tägliche Sonnenscheindauer um fünfzehn Minuten oder sechs Prozent ab, die Bewölkung dafür im selben Maß zu.

Den Grund für dieses Muster vermuten die Forscher in Ruß- und Sulfatpartikeln, die Industrie und Verkehr mit den Abgasen verstärkt an Werktagen ausstoßen. Diese so genannten Aerosole absorbieren nicht nur direkt das Sonnenlicht, sondern wirken auch als Kondensationskeime für die Luftfeuchtigkeit. Dadurch fördern sie die Wolkenbildung und sorgen so, da ein gewisser Kumulations- und Verzögerungseffekt auftritt, ausgerechnet am Wochenende für schlechtes Wetter.

Geophysical Research Letters, Bd. 34, S. L03819

Mitarbeit: S. Hollstein, S. Hügler und A. Römer

PETER TUTHILL, UNIVERSITY SYDNEY / PALOMAR OBSERVATORY AND KECK OBSERVATORY

Das Rote Quadrat

Ein fast quadratischer Nebel in strahlendem Rot ist der jüngste Neuzugang in der Galerie der schönsten Himmelsobjekte. Peter Tuthill von der Universität Sydney und James Lloyd von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) entdeckten ihn, als sie mit dem Hale und dem Keck 2 Telescope Infrarot-Aufnahmen des rund 5000 Lichtjahre entfernten Sterns MWC 922 im Sternbild Schlange machten. Von diesem erstrecken sich diametral entgegengesetzt zwei Staubkegel mit Öffnungswinkeln von fast genau neunzig Grad, auf die wir von der Seite blicken. Wie das schon länger bekannte Rote Rechteck enthält der Nebel »Leitersprossen«. Zudem sind radiale Speichen erkennbar, die wie Zinken eines Kamms wirken. Tuthill und Lloyd erklären sie mit der Schattenwirkung von Wellen auf der Oberfläche des Sterns.

Angemerkt

Abenteuer im Welt-Raum

Von einem Glücksritter auf ungewohntem Terrain

Ich sollte mich nicht zu genau festlegen, weil sich diese Zahl praktisch jede Minute ändert, aber jetzt, da ich diese Zeilen schreibe, hat MySpace rund 175 Millionen Einwohner. Vor gut einem Jahr, als ich meine eigene kleine Raumstation dort gründete, waren es nur knapp ein Drittel so viele.

Was trieb mich Wissenschaftsschreiberling mittleren Alters dazu, sich in Gefilde zu wagen, die dem Vernehmen nach überwiegend von exhibitionistischen Teens und Twens bevölkert sind? Nun, ich hatte mehrfach gelesen, dass Popgrößen – etwa die Senkrechtstarterin Lily Allen – MySpace zunehmend zur Vermarktung ihrer Produkte nutzen. Auch einige neue Bücher von mir konnten eine bessere Vermarktung gebrauchen – darunter passenderweise eine Einführung in die Astrobiologie, in der es um Leben auf der Erde und im Weltall geht.

Warum also nicht ins außerirdische Abenteuer starten? Anmelden ist ganz einfach, eine funktionierende E-Mail-Adresse genügt. Schwerer fällt da schon, in der wimmelnden Millionenbevölkerung ein sinnvolles Netzwerk von »Freunden« aufzubauen. Immerhin fängt man nicht bei null an, sondern bei eins – dem serienmäßig mitgelieferten Freund Tom. Benannt nach einem der Gründer von MySpace, hat er ab und zu recht nützliche Dinge mitzuteilen.

Ansonsten fühlt sich MySpace an wie eine Großstadt: unbekannte Gesichter überall, aber auch unzählige konkrete Kommunikationsangebote, die praktisch alle Interessenbereiche abdecken. Ein guter Startpunkt zum Knüpfen von Kontakten sind die Gruppen. Sie funktionieren ähnlich wie Pinnwände. Und siehe da, es gab sogar eine Gruppe für Astrobiologie. Die hat zwar nur rund ein Dutzend aktive Mitglieder und schläft bisweilen wochenlang ein, aber mit der Ankündigung meines Buchs konnte ich sie zeitweise aufwecken. Ein leicht exzentrisch anmutendes Mitglied entpuppte sich als Professor an einer US-Universität, der sich prompt ein Ansichtsexemplar anforderte, um womöglich einen eigenen Kurs darüber zu veranstalten.

Neben Gruppen für konventionellere Gebiete wie Chemie, Biochemie und Mikrobiologie habe ich solche aufgesucht, die meinen musikalischen und sonstigen kulturellen Vorlieben entsprechen. Manchmal akzeptierte ich dabei auch Freundschaftsangebote, die mir etwas merkwürdig vorkamen, aber irgendwie muss man sich ja hocharbeiten. Und so verfüge ich heute mit 72 Freunden schon über ein ansehnliches Beziehungsnetz in den Weiten des virtuellen Weltalls.

Zum echten MySpace-Erlebnis gehört natürlich auch ein Blog. So ein elektronisches Tagebuch ist unendlich praktisch. Neben den regelmäßigen Produktionen meiner kleinen Prosafabrik kann ich Links, Bilder, ganze Artikel, Rezensionen meiner Bücher – halt alles, was so anfällt – einfach schwupps hineinkopieren. Und es finden sich sogar Leute, die das lesen. Inzwischen bringt es mein MySpace-Blog auf mehr Klicks als die Hauptseite meiner seit zehn Jahren etablierten Website.

Was fehlt mir noch zu meinem Weltraumglück? Tja, tapezieren müsste ich meine Raumstation mal. Wenn man sich so umschaut, hat fast jeder einen interessant gestalteten Hintergrund auf seiner Seite, nur meiner ist noch in der Standardversion. Aber bald ...

Michael Groß

www.myspace.com/proseandpassion

ihnen rotierten mit einer Geschwindigkeit von über 118 Kilometer pro Stunde, was sie als Hurrikane auswies.

Wieso waren es so wenige? Forscher um Mojib Latif vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel glauben nun einen wesentlichen Grund dafür gefunden zu haben. Mit Computersimulationen entdeckten sie einen neuen Hebel im Klimasystem, der die Häufigkeit und Stärke von Wirbelstürmen im Atlantik beeinflusst *(Geophysical Research Letters, Bd. 34, L01710)*.

Die Zahl der tropischen Stürme (graue Linien) und Hurrikane (schwarze Linien) im Nordatlantik hat sich 2006 gegenüber dem Rekordjahr 2005 nicht nur drastisch verringert; die Zugbahnen verliefen auch deutlich weiter östlich. Die Oberflächentemperatur des Wassers ist farbkodiert und steigt von blauviolett nach hellbeige.

Eine schon länger bekannte Hurrikanbremse ist das natürliche Klimaphänomen El Niño, das alle drei bis acht Jahre in unterschiedlicher Ausprägung auftritt. Dabei erwärmt sich der Ostpazifik um mehrere Grad Celsius. Normalerweise führt der Humboldtstrom kaltes Wasser aus der Antarktis vor der Westküste Südamerikas nach Norden, aber in unregelmäßigen Abständen reißt er ab – aktuell geschah das wieder im August/September 2006.

Einerseits ist El Niño dafür berüchtigt, weltweit verheerende Wetteranomalien und dadurch Naturkatastrophen auszulösen wie

- Überschwemmungen entlang den Westküsten Süd- und Nordamerikas,
- Dürren im südlichen Afrika, in Australien und Südostasien und
- ausbleibende Fischschwärme an der südamerikanischen Westküste.

Andererseits schenkt er der Atlantikregion meist eine Saison mit wenigen Hurrikanen. Spätestens seit dem ausgeprägten El Niño 1997 wissen und berücksichtigen auch die NOAA-Forscher, dass der erwärmte Ostpazifik die tausende Kilometer entfernt entstehenden Wirbelstürme im Atlantik dämpft. Doch ließ sich bisher nicht genau beziffern, wie stark. Vergleicht man Ostpazifik-Temperatur und Sturmaktivität über alle Jahre seit 1850 miteinander, ergibt sich statt einer eindeutigen Korrelation nur ein Trend. Meist führt El Niño zu einer etwas abgeschwächten Hurrikansaison.

Hinzu kommt ein zweiter Effekt: El Niño hält die Hurrikane vom amerika- ▷

PLANETOLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Asteroidencrash löste Meteoritenhagel aus

Trümmer einer Asteroidenkollision vor 470 Millionen Jahren prasselten in den folgenden Jahrmillionen auf die Erde. Selbst 38 Prozent aller in jüngster Zeit niedergegangenen Meteorite sind noch Fragmente von damals.

Von Mario Trieloff

Die Erde steht seit ihren Anfangstagen unter Beschuss durch extraterrestrische Körper. Zum Glück messen die meisten nur wenige Millimeter und verglühen in der Atmosphäre als Sternschnuppen. Einmal in einigen 100 000 Jahren trifft im Durchschnitt aber auch ein Brocken von mindestens einem halben Kilometer Durchmesser auf unseren Planeten.

Solche großen Objekte prallen – von der Atmosphäre fast nicht gebremst – mit einer typischen Geschwindigkeit zwischen zwanzig und fünfzig Kilometer pro Sekunde auf den Boden und verdampfen dabei vollständig. Zurück bleibt nichts als ein Einschlagkrater.

Nur zentimeter- bis metergroße Körper überleben sowohl die Passage durch die Atmosphäre als auch den Aufprall am Boden und bleiben als Meteorite erhalten. Etwa 30 000 von ihnen finden sich in den weltweiten Sammlungen.

Obwohl einige Meteorite vom Mond oder Mars stammen, kommen die allermeisten aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Dort drängen sich auf engem Raum die Kleinplaneten im Sonnensystem und stoßen wegen ihrer großen Zahl gelegentlich zusammen.

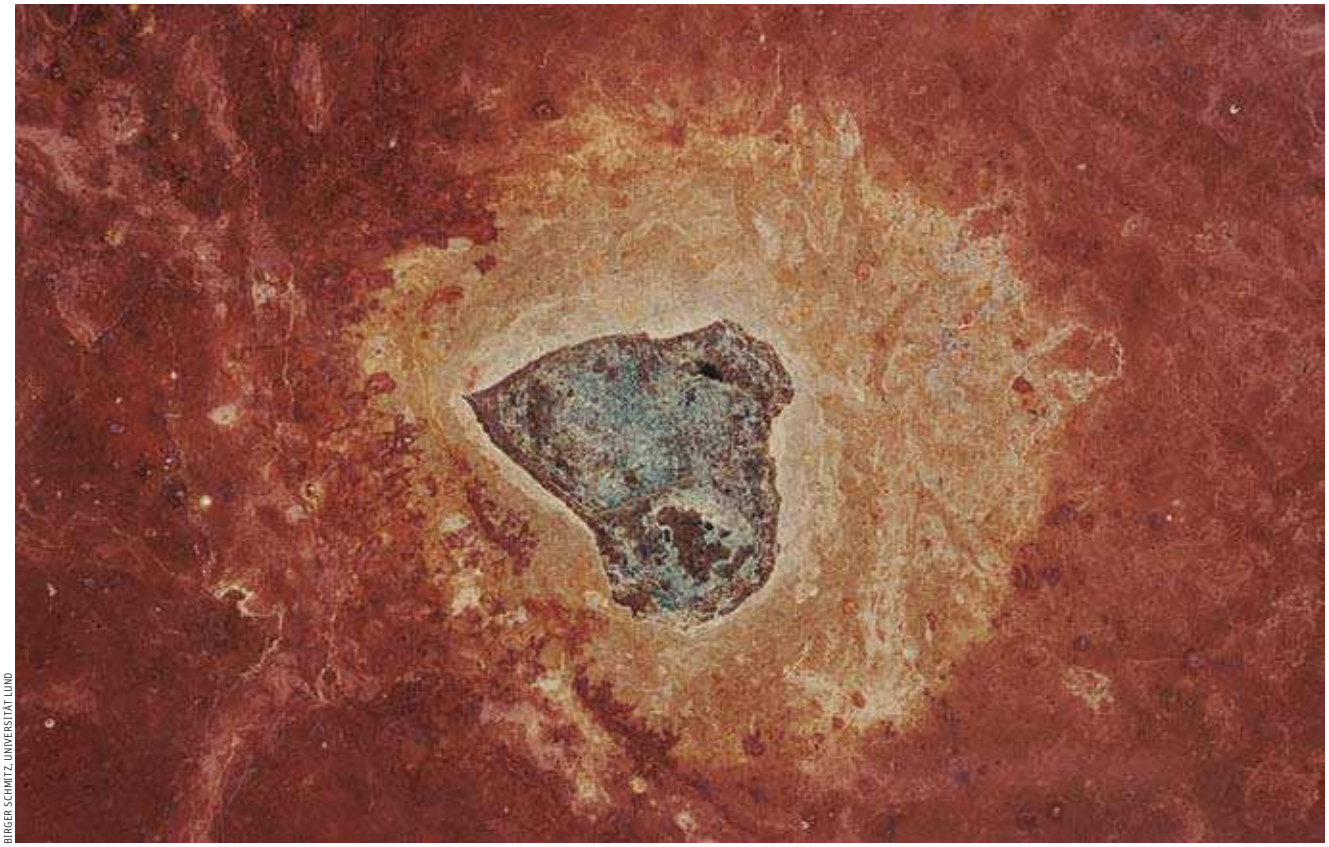
Bei solchen Kollisionen sind mittlerweile die meisten der einst hunderte Kilometer großen Asteroiden in kleinere Fragmente zersplittert. Diese können unter dem Einfluss der benachbarten Riesenplaneten Jupiter und Saturn in einer Weise abgelenkt werden, dass sie beim Umlauf um die Sonne die Mars- oder Erdbahn kreuzen. Das gilt speziell für kleine, metergroße Gesteinskörper. Solche Trümmer können daher schon wenige hunderttausend bis Millionen Jahre nach einer Asteroidenkollision als Meteorite die Erde erreichen.

Zählungen und Datierungen von Einschlagkratern auf den Planetenoberflächen zeigen, dass die Trefferquote kleiner Körper in den letzten knapp drei Milliarden Jahren im inneren Sonnensystem in etwa konstant war. Die aufgefundenen Meteorite selbst sind für eine solche Abschätzung nicht zu gebrauchen, weil sie fast ausnahmslos erst in den letzten 2 Millionen Jahren niedergegangen sind. Ältere Exemplare haben Verwitterung und Erosion in der Regel nicht überstanden.

KNUT METZLER, MÜNSTER

Dieser Schnitt durch eine Kalksteinplatte zeigt einen fossilen L-Chondriten, der kurz nach der Kollision seines Mutterasteroiden im mittleren Ordovizium in ein Flachmeer gestürzt ist und in den Sedimenten eingeschlossen wurde. Normalerweise sind so alte Meteorite verwittert und nicht mehr erhalten.

Obwohl der Meteorit, von dem diese Bruchstücke stammen, vor höchstens zwei Millionen Jahren in der Sahara niederging, entstammt er einer Asteroidenkollision vor rund 470 Millionen Jahren. Es handelt sich um einen so genannten L-Chondriten. 38 Prozent der auf der Erde gefundenen Meteorite gehören zu diesem Typ.



BIRGER SCHMITZ, UNIVERSITÄT LUND

Doch es gibt eine Ausnahme: Vor etwa fünfzehn Jahren entdeckte das Team von Birger Schmitz an der Universität Lund in einem schwedischen Steinbruch zahlreiche fossile Meteorite in Kalkstein aus dem mittleren Ordovizium (Bild oben). Sie mussten demnach vor rund einer halben Milliarde Jahren auf die Erde gestürzt sein. Anhand ihrer relativ großen Zahl bezogen auf die räumlich begrenzte Fundstelle konnte das Forscherteam abschätzen, dass im mittleren Ordovizium Objekte dieser Größe etwa hundertmal so häufig niedergegangen sind wie heute.

Wegen der starken Verwitterung war die mineralogisch-chemische Zuordnung der Fundstücke zu den bekannten Meteoritenklassen allerdings schwierig. Schmitz und seine Mitarbeiter vermuteten immerhin, dass es sich um L-Chondrite handeln könnte, die 38 Prozent aller weltweit gefundenen Meteorite ausmachen. Diese sind zwar fast ausnahmslos erst in jüngster Zeit auf die Erde gestürzt; ihre Datierung mit der Kalium-Argon-Methode ergibt aber ein so genanntes Entgasungsalter von ebenfalls rund einer halben Milliarde Jahren.

Bei diesem Alter handelt es sich um den Zeitpunkt, an dem das Gestein des Meteoriten zum letzten Mal geschmolzen oder zumindest so hoch erhitzt worden war, dass das enthaltene Argon – ein reaktionsträges Edelgas – entweichen konnte. Nach dem Abkühlen entstand dann aus dem Kalium-Isotop der Masse 40 durch radioaktiven Zerfall neues Argon-40. Dessen Menge zeigt somit die seither vergangene Zeit an.

Als ziemlich kleine Körper haben Asteroide nur unmittelbar nach ihrer Entstehung vor 4,5 Milliarden Jahren eine kurze Phase eigener geologischer Aktivität durchgemacht, in der sich ihr Inneres stark aufheizte. Der einzige Prozess, der ihr Gestein danach noch stark erwärmen, dabei entgasen und somit die Kalium-Argon-Uhr auf null stellen konnte, ist die Aufheizung durch energiereiche Zusammenstöße.

Mitbringsel aus Oman

Das Entgasungsalter eines Meteoriten liefert also den Zeitpunkt einer heftigen Kollision seines Mutterasteroiden. Dabei treten Stoßwellen mit einem Spitzendruck von mehreren hundert Kilobar auf – vergleichbar mit dem Druck im Erdinneren in 2000 Kilometer Tiefe. Unter diesen Bedingungen verändern sich Minerale und Gestein; Fachleute sprechen von Impaktmetamorphose. Sie ist bei L-Chondriten hochgradig ausgeprägt.

Trotzdem entwich, wie sich herausstellte, das Argon-40 fast nie vollständig. Meist blieben Reste im Gestein, die sich kaum von dem Edelgas unterscheiden lassen, das nach der Impaktmetamorphose durch Kalium-40-Zerfall neu entstand und das Kollisionsalter anzeigt. Darin liegt das größte Problem und die Hauptfehlerquelle der Kalium-Argon-Datierung von L-Chondriten.

Im Herbst 2004 brachte Ekaterina Korochantseva als Gastwissenschaftlerin aus Moskau im Rahmen eines Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft Bruchstücke eines Meteoriten aus der Wüste von Oman mit nach Heidelberg. Auch dieser L-Chondrit enthielt, wie sich zeigte, ursprüngliches oder »überschüssiges« Argon-40 – allerdings in solchen Mengen, dass es das Interesse unserer Gruppe am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg weckte.

Zusammen mit unseren russischen Kollegen vom Wernadski-Institut in Moskau und dem Institut für Planetologie in Münster führten wir deshalb eine genauere Analyse durch. Dabei erkannten wir, dass das überschüssige Argon-40 nicht – wie bislang allgemein an- ▷

▷ genommen – während der Aufheizung beim Zusammenstoß einfach im Ursprungsmineral geblieben war. Es hatte dieses sehr wohl verlassen, war dann jedoch von anderen Mineralen wieder eingefangen worden.

Ungewöhnliche Häufung von Einschlagkratern

Dieser kleine, aber feine Unterschied ermöglichte einen entscheidenden Fortschritt. Während der kurzen Wanderung konnte sich das Überschuss-Argon-40 nämlich mit einem anderen, gleichfalls im Meteoriten vorkommenden Argon-Isotop mischen, das die Atommasse 36 hat. Das verpasste ihm eine Art Stempel, der es mit geeigneten Verfahren von dem nach der Impaktmetamorphose entstandenen Edelgas unterscheidbar machte. Erstmals konnten wir so eine genaue Korrektur vornehmen und das exakte Entgasungsalter bestimmen.

Als wir mehrere L-Chondrite mit dieser Methode genau datierten, erhielten wir übereinstimmend Werte von 470±6 Millionen Jahren. Parallel dazu ließ sich anhand stratigrafischer Korrelationen auch der Zeitpunkt, zu dem die Kalkschicht mit den fossilen Meteoriten in Schweden abgelagert worden war, präzise in die geologische Zeitskala einordnen. Demnach geschah die Ablagerung vor 467±2 Millionen Jahren.

Die Übereinstimmung dieser beiden Werte bestätigt die ursprüngliche Klassifizierung der ordovizischen Meteorite durch Schmitz. Zugleich erlaubt sie, das damalige Geschehen im Detail zu rekonstruieren. Vor etwa 470 Millionen Jahren kollidierten demnach zwei Asteroide zwischen Mars und Jupiter. Sie heizten sich dabei stark auf und schmolzen teilweise. Durch die Kompression beim Zusammenstoß entstanden Hochdruckminerale.

Wie aus der hochgradigen Impaktmetamorphose hervorgeht, blieb der Spitzendruck ungefähr eine Sekunde lang aufrechterhalten. Das deutet darauf hin, dass der Durchmesser des Einschlagkörpers mindestens mehrere Kilometer betrug, während der Mutterasteroid der L-Chondrite wohl einige hundert Kilometer maß. Metergroße Fragmente der Kollision gerieten schon bald auf erdkreuzende Umlaufbahnen, sodass 1 bis 2 Millionen Jahre lang etwa hundertmal so viele Meteorite auf den Globus prasselten wie heute.

In den 20 Millionen Jahren nach dem Zusammenstoß trafen aber auch wesentlich mehr kilometergroße Bruchstücke als üblich auf die Erde. Das zeigt sich an der ungewöhnlich großen Zahl von acht Einschlagkratern, die zwischen 450 und 470 Millionen Jahre alt sind und Durchmesser von zwei bis dreißig Kilometern haben: Neugrund, Granby, Ames, Kärdla, Tvären, Lockne, Slate Islands und Calvin. Normalerweise hätten in diesem Zeitraum nur zwei derart große Einschlagkrater entstehen dürfen.

Für lange Zeit gelangte wohl auch deutlich mehr kosmischer Staub in die Erdatmosphäre – wie bei den Meteoriten vermutlich etwa das Hundertfache der heutigen Menge (derzeit ist in der obersten Erdatmosphäre ungefähr die Hälfte aller Staubteilchen außerirdischen Ursprungs). Wie sich all dies auf das Klima auswirkte, lässt sich nur vermuten. Schmitz hält es für möglich, dass ein Zusammenhang zwischen dem damaligen kosmischen Bombardement und der großen Biodiversifikation im mittleren bis späten Ordovizium besteht.

Auch heute durchziehen noch größere Bruchstücke der damaligen Kollision unser Sonnensystem. Von diesen lösten sich in den letzten Jahrmillionen von Zeit zu Zeit durch kleinere Einschläge metergroße Körper ab, die als moderne L-Chondrite auf der Erde niedergingen. Sie machen immerhin gut ein Drittel aller Meteoritenfälle aus. Noch immer erleben wir also die Nachwehen der kosmischen Kollision vor 470 Millionen Jahren.

Mario Trieloff ist Privatdozent am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg. Sein Arbeitsschwerpunkt sind Gesteinsdatierungen sowie Studien zur Entstehung und Entwicklung von Planeten.

METEOROLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

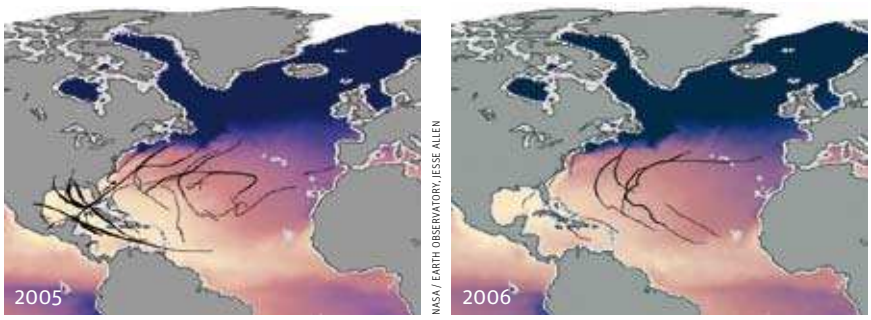
Wirbelstürmen war es 2006 zu windig

Die Rekord-Hurrikansaison 2005 schien zu den Warnungen zu passen, dass der Klimawandel Stürme und Unwetter verstärkt. Doch 2006 hielt der Trend nicht an: Es gab nur fünf Hurrikane statt fünfzehn wie im Jahr davor. Warum?

Von Thomas Langkamp

Sage und schreibe 28 tropische Stürme, davon fünfzehn Hurrikane, tobten 2005 über dem Atlantik – ein Rekord. Besonders verheerend wütete »Katrina«, deren Sturmflut achtzig Prozent von New Orleans unter Wasser setzte.

Auch die Versicherungswirtschaft verbuchte rekordverdächtige Schadenssummen und fragte sich, was 2006 kommen würde. Doch die letztjährige Hurrikansaison fiel überraschend ruhig aus. Alljährlich gibt das Nationale Hurrikanzentrum der US-Behörde für Ozean und Atmosphäre (NOAA) Prognosen für die kommende Wirbelsturmsaison ab. Für 2006 sollte es sich gründlich täuschen. Am Ende waren nur halb so viele Stürme aufgetreten wie prophezeit. Fünf von



NASA / EARTH OBSERVATORY, JESSE ALLEN

Angemerkt

Abenteuer im Welt-Raum

Von einem Glücksritter auf ungewohntem Terrain

Ich sollte mich nicht zu genau festlegen, weil sich diese Zahl praktisch jede Minute ändert, aber jetzt, da ich diese Zeilen schreibe, hat MySpace rund 175 Millionen Einwohner. Vor gut einem Jahr, als ich meine eigene kleine Raumstation dort gründete, waren es nur knapp ein Drittel so viele.

Was trieb mich Wissenschaftsschreiberling mittleren Alters dazu, sich in Gefilde zu wagen, die dem Vernehmen nach überwiegend von exhibitionistischen Teens und Twens bevölkert sind? Nun, ich hatte mehrfach gelesen, dass Popgrößen – etwa die Senkrechtstarterin Lily Allen – MySpace zunehmend zur Vermarktung ihrer Produkte nutzen. Auch einige neue Bücher von mir konnten eine bessere Vermarktung gebrauchen – darunter passenderweise eine Einführung in die Astrobiologie, in der es um Leben auf der Erde und im Weltall geht.

Warum also nicht ins außerirdische Abenteuer starten? Anmelden ist ganz einfach, eine funktionierende E-Mail-Adresse genügt. Schwerer fällt da schon, in der wimmelnden Millionenbevölkerung ein sinnvolles Netzwerk von »Freunden« aufzubauen. Immerhin fängt man nicht bei null an, sondern bei eins – dem serienmäßig mitgelieferten Freund Tom. Benannt nach einem der Gründer von MySpace, hat er ab und zu recht nützliche Dinge mitzuteilen.

Ansonsten fühlt sich MySpace an wie eine Großstadt: unbekannte Gesichter überall, aber auch unzählige konkrete Kommunikationsangebote, die praktisch alle Interessenbereiche abdecken. Ein guter Startpunkt zum Knüpfen von Kontakten sind die Gruppen. Sie funktionieren ähnlich wie Pinnwände. Und siehe da, es gab sogar eine Gruppe für Astrobiologie. Die hat zwar nur rund ein Dutzend aktive Mitglieder und schläft bisweilen wochenlang ein, aber mit der Ankündigung meines Buchs konnte ich sie zeitweise aufwecken. Ein leicht exzentrisch anmutendes Mitglied entpuppte sich als Professor an einer US-Universität, der sich prompt ein Ansichtsexemplar anforderte, um womöglich einen eigenen Kurs darüber zu veranstalten.

Neben Gruppen für konventionellere Gebiete wie Chemie, Biochemie und Mikrobiologie habe ich solche aufgesucht, die meinen musikalischen und sonstigen kulturellen Vorlieben entsprechen. Manchmal akzeptierte ich dabei auch Freundschaftsangebote, die mir etwas merkwürdig vorkamen, aber irgendwie muss man sich ja hocharbeiten. Und so verfüge ich heute mit 72 Freunden schon über ein ansehnliches Beziehungsnetz in den Weiten des virtuellen Weltalls.

Zum echten MySpace-Erlebnis gehört natürlich auch ein Blog. So ein elektronisches Tagebuch ist unendlich praktisch. Neben den regelmäßigen Produktionen meiner kleinen Prosafabrik kann ich Links, Bilder, ganze Artikel, Rezensionen meiner Bücher – halt alles, was so anfällt – einfach schwupps hineinkopieren. Und es finden sich sogar Leute, die das lesen. Inzwischen bringt es mein MySpace-Blog auf mehr Klicks als die Hauptseite meiner seit zehn Jahren etablierten Website.

Was fehlt mir noch zu meinem Weltraumglück? Tja, tapezieren müsste ich meine Raumstation mal. Wenn man sich so umschaut, hat fast jeder einen interessant gestalteten Hintergrund auf seiner Seite, nur meiner ist noch in der Standardversion. Aber bald ...

Michael Groß

www.myspace.com/proseandpassion

ihnen rotierten mit einer Geschwindigkeit von über 118 Kilometer pro Stunde, was sie als Hurrikane auswies.

Wieso waren es so wenige? Forscher um Mojib Latif vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel glauben nun einen wesentlichen Grund dafür gefunden zu haben. Mit Computersimulationen entdeckten sie einen neuen Hebel im Klimasystem, der die Häufigkeit und Stärke von Wirbelstürmen im Atlantik beeinflusst *(Geophysical Research Letters, Bd. 34, L01710)*.

Die Zahl der tropischen Stürme (graue Linien) und Hurrikane (schwarze Linien) im Nordatlantik hat sich 2006 gegenüber dem Rekordjahr 2005 nicht nur drastisch verringert; die Zugbahnen verliefen auch deutlich weiter östlich. Die Oberflächentemperatur des Wassers ist farbkodiert und steigt von blauviolett nach hellbeige.

Eine schon länger bekannte Hurrikanbremse ist das natürliche Klimaphänomen El Niño, das alle drei bis acht Jahre in unterschiedlicher Ausprägung auftritt. Dabei erwärmt sich der Ostpazifik um mehrere Grad Celsius. Normalerweise führt der Humboldtstrom kaltes Wasser aus der Antarktis vor der Westküste Südamerikas nach Norden, aber in unregelmäßigen Abständen reißt er ab – aktuell geschah das wieder im August/September 2006.

Einerseits ist El Niño dafür berüchtigt, weltweit verheerende Wetteranomalien und dadurch Naturkatastrophen auszulösen wie

- Überschwemmungen entlang den Westküsten Süd- und Nordamerikas,
- Dürren im südlichen Afrika, in Australien und Südostasien und
- ausbleibende Fischschwärme an der südamerikanischen Westküste.

Andererseits schenkt er der Atlantikregion meist eine Saison mit wenigen Hurrikanen. Spätestens seit dem ausgeprägten El Niño 1997 wissen und berücksichtigen auch die NOAA-Forscher, dass der erwärmte Ostpazifik die tausende Kilometer entfernt entstehenden Wirbelstürme im Atlantik dämpft. Doch ließ sich bisher nicht genau beziffern, wie stark. Vergleicht man Ostpazifik-Temperatur und Sturmaktivität über alle Jahre seit 1850 miteinander, ergibt sich statt einer eindeutigen Korrelation nur ein Trend. Meist führt El Niño zu einer etwas abgeschwächten Hurrikansaison.

Hinzu kommt ein zweiter Effekt: El Niño hält die Hurrikane vom amerika- ▷

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,30 statt € 6,90. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,45.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Auf dieser Seite und unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können.

» Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com
oder per Internet:

w w w . s p e k t r u m . d e / a b o

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

Wenn Sie Spektrum der Wissenschaft selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

LESER WERBEN LESER

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Toolbag von Reisenthel:
enthält alles, was für Reparaturen im Haushalt benötigt wird.

PRODUKT DES MONATS

Inversis ®Oloid
Paul Schatz (1898 – 1979) enwickelte das Oloid aus den Bewegungen des umstülpbaren Würfels. Größe: ca. 7 cm, Olivenholz, in Schmuckschachtel verpackt. Preis für Abonnenten € 28,– (statt € 35,–) inkl. Versand Inland

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

▷ nischen Festland fern, indem er über dem äquatorialen Ostpazifik die Richtung der normalerweise aus Osten wehenden Passatwinde umkehrt. Das macht sich bis in den Atlantik bemerkbar. Dort drücken die umgedrehten Passate gegen die Zugbahn der Wirbelstürme. Nur einer der fünf Hurrikane von 2006, Ernesto, konnte bei diesem Gegenwind die amerikanische Ostküste erreichen und größere Schäden anrichten.

Temperaturgefälle entscheidend

Angesichts der nur schwachen Korrelation zwischen El Niño und Hurrikanen suchten die Kieler Wissenschaftler nach weiteren Faktoren, die eine Rolle spielen könnten. Dazu starteten sie Simulationen mit dem am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelten Computermodell Echam5. Dessen Vorhersagen fanden unter anderem Eingang in den jüngst veröffentlichten vierten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der Vereinten Nationen.

Bei einer Auflösung von 125×125 Kilometern und 31 Höhenstufen berechnete das Forscherteam, wie sich die Oberflächentemperaturen der verschiedenen Ozeane auf die Häufigkeit und Stärke von Hurrikanen auswirken. Die Analyse der Ergebnisse zeigte: Die Temperaturdifferenzen sind der springende Punkt. So stand 2005 einem relativ kalten Pazifischen und Indischen Ozean ein sehr warmer Atlantik gegenüber. Der Temperaturunterschied war groß, und es kam zu verheerenden Hurrikanen. Anders 2006: Indik und Pazifik – insbesondere der Ostpazifik durch El Niño – erwärmten sich und erreichten fast die Temperatur des immer noch sehr warmen Atlantiks.

Daraus resultierte neben El Niño ein zweiter Bremseffekt für Hurrikane. Die geringe Temperaturdifferenz zwischen Pazifik/Indik und Atlantik führt über Letzterem zu einer starken vertikalen Windscherung, bei der die Geschwindigkeit der Luftströmungen stark mit der Höhe variiert. Typisch sind langsame Boden- kombiniert mit schnellen Höhenwinden. Eine vertikale Windscherung unter sechs Meter pro Sekunde fördert, wie schon länger bekannt ist, die Bildung von tropischen Zyklonen; ab acht Meter pro Sekunde behindert sie jedoch die Entstehung von Hurrikanen.

Mit den Computersimulationen konnten die Kieler Forscher die Ursache der Scherwinde nun genauer ergründen. So gelang es ihnen unter gleichzeitiger Berücksichtigung von El Niño und anderen Faktoren auch, die unerwartete Ruhe im vergangenen Jahr zu erklären. 2006 waren die Scherwinde über dem Nordatlantik sehr ausgeprägt und zerstreuten aufkeimende Wirbelsturmzellen. In den Jahren davor verhielt es sich umgekehrt: Schwache Scherwinde verhalfen den Hurrikanen zu voller Entfaltung. »Mit den neuen Erkenntnissen können wir sehr viel verlässlicher als bisher schon im Frühsommer prognostizieren, ob es viele oder wenige Hurrikane geben wird«, meint Mojib Latif, schränkt jedoch ein: »Dieses Instrument ist natürlich nicht dazu geeignet, das Entstehen und die Zugbahn einzelner Hurrikane vorherzusagen, das bleibt Aufgabe der Wettervorhersage.«

Klimawandel verstärkt Hurrikane, vermehrt sie aber nicht

Die Erwärmung der Luft und damit der Ozeane verschafft dem System Erde mehr Energie, die sich irgendwann entlädt. Deshalb vermuten viele Wissenschaftler, dass die große Anzahl und Wucht von Hurrikanen der letzten Jahre auf den globalen Klimawandel zurückzuführen ist. Angesichts der Erkenntnisse aus seiner Studie stimmt Latif diesem Zusammenhang jedoch nur teilweise zu: »Wir erwarten durch den Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen infolge der globalen Erwärmung zwar ein ▷

Wie El Niño die Hurrikansaison beeinflusst

El Niño (spanisch für Christkind) tritt in unregelmäßigem Abstand von drei bis acht Jahren jeweils im Winter auf. Der Name beschreibt eine natürliche Wetteranomalie, die von erwärmtem Oberflächenwasser nahe dem Äquator im Ostpazifik ausgelöst wird.

Der Humboldtstrom transportiert in der Regel kaltes Wasser aus der Antarktis entlang der Westküste Lateinamerikas nach Norden. Am Äquator wird er von den Passatwinden nach Westen abgelenkt. Das Oberflächenwasser erwärmt sich nun und staut sich an den Küsten Australiens und Indonesiens auf.

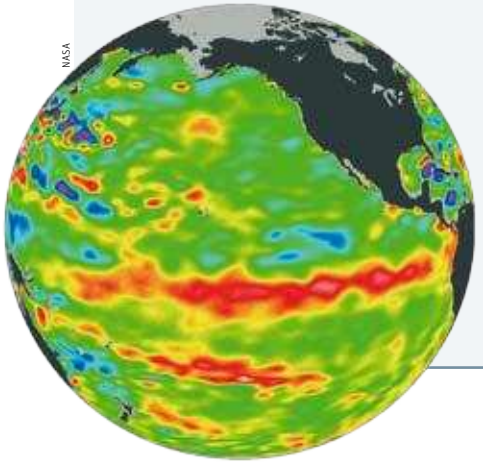
Verschieben sich die Passatwinde nach Norden, fluten diese warmen Wassermassen nach Südamerika zurück und verdrängen dort den Humboldtstrom. So wird der Nachschub kalten Wassers unterbrochen und der Ostpazifik erwärmt sich, je nachdem wie stark El Niño ausfällt, um bis zu 2,5 Grad Celsius im dreimonatigen Mittel.

Gleichzeitig ändert sich das äquatoriale Windsystem über dem Pazifik: die so genannte Walker-Zirkulation. Normalerweise steigt die Luft im warmen Westen vor Australien und Indonesien auf, strömt in der Höhe zum kalten Wasser vor der südamerikanischen Küste, sinkt dort ab und weht als Ostpassat über den Pazifik zurück Richtung Australien.

Fehlt der Temperaturgradient oder kehrt er sich gar um, dann erlahmt die Walker-Zirkulation oder ändert ihr Vorzeichen. Unter diesen Umständen weht der Passat nach Osten, und die Scherwinde schwächen sich ab. Über dem Atlantik hingegen verstärkt El Niño mit schnellen, hohen Westwinden die Windscherung und behindert so die Entstehung von Wirbelstürmen. Das alles geschieht innerhalb weniger Monate.

Die gesamte pazifische Ozean- und Windzirkulation wird Enso genannt (El Niño Southern Oscillation). Außer dem Normalzustand und El Niño gibt es auch dessen Gegenteil: La Niña. Dabei verstärkt sich der Humboldtstrom, sodass an der Oberfläche des Ostpazifiks ungewöhnlich tiefe Temperaturen herrschen.

Ende letzten Jahres kam es zu einem El-Niño-Ereignis, das die Hurrikanhäufigkeit senkte, obwohl es nicht sehr ausgeprägt war. Die Satellitenaufnahme vom 5. September 2006 zeigt den Anstieg des Meeresspiegels auf Grund der erhöhten Wassertemperatur im Ostpazifik.



NASA

häufigeres Auftreten sehr starker Hurrikane, aber insgesamt nicht unbedingt mehr tropische Wirbelstürme.«

Nach den Erkenntnissen der Kieler Wissenschaftler kommt es auf die Temperaturdifferenzen zwischen allen Ozeanen und die daraus resultierenden Scherwinde an. Diese Differenzen aber hängen von den großen Meeresströmungen ab, zu denen außer El Niño im Ostpazifik auch der Golfstrom im Nordatlantik gehört. »Wenn man sich zum Beispiel vorstellt, dass das Abtauen des arktischen Eispanzers den Golfstrom vor Europa leicht abschwächt und so das Oberflächenwasser abkühlt, dann könnte die Intensität der Wirbelstürme auch abnehmen«, gibt Latif zu bedenken.

Die Prognosen für dieses Jahr sind bisher sehr unsicher. Am 8. Dezember 2006 gingen die Experten noch von einer längeren Dauer des El-Niño-Ereignisses aus. Entsprechend rechneten sie für 2007 mit einer nur leicht überdurchschnittlichen Saison, die vierzehn tropische Stürme und sieben Hurrikane, davon drei starke, bringen sollte. Doch da sich der Ostpazifik in diesem Frühjahr überraschend schnell wieder abgekühlt hat, korrigierten die Fachleute ihre Schätzungen am 3. April nach oben: auf nunmehr siebzehn tropische Stürme und neun Hurrikane. Doch erst ab Juli/August werden die Vorhersagen in der Regel relativ zuverlässig.

Langfristig erscheinen die Aussichten jedenfalls eher düster. Atlantischer, Indischer und Pazifischer Ozean zeigen seit etwa 1975 im Mittel einen klaren Erwärmungstrend. Dabei hat sich der Atlantik bisher schneller aufgeheizt als die anderen Meere. Setzt sich diese Tendenz fort, wächst die Temperaturdifferenz zwischen ihm und Indik sowie Pazifik. Die Scherwinde würden dadurch schwächer, die Hurrikane stärker und stärker.

Obwohl die Hurrikansaison 2006 gegenüber 2005 schwach erschien, entsprach sie dem langjährigen Durchschnitt. Das Klimaphänomen El Niño, das mit einer Erwärmung des Ostpazifiks einhergeht, dämpft Wirbelstürme im Atlantik, während La Niña, sein Gegenteil, sie verstärkt. Die Hurrikansaison dauert in der Regel vom 1. Juni bis zum 30. November. Je nach Windgeschwindigkeit werden Hurrikane in die Kategorien 1 (118 Kilometer pro Stunde) bis 5 (über 249 Kilometer pro Stunde) eingestuft.

Thomas Langkamp ist Student der Geowissenschaften und freier Journalist in Hamburg.

ARCHÄOLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Blutiges Ende einer frühen Stadt

Durch Obsidianverarbeitung und -handel war vor fast 6000 Jahren in Nordsyrien – in Konkurrenz zum sumerischen Uruk in Mesopotamien – die Stadt Hamoukar groß geworden. Doch ihr Wohlstand wurde ihr zum Verhängnis.

CLEMENS REICHEL

Von Clemens Reichel

Der Angriff kam plötzlich und mit überwältigender Wucht. Vergebens versuchten die Verteidiger, sich dem Ansturm zu widersetzen. Ein Hagel aus geschleuderten Lehmkugeln ging nieder und eine verheerende Feuersbrunst brach aus. Gebäude stürzten ein und begruben alles in ihrem Inneren unter sich. Nachdem der Rauch sich verzogen hatte, bargen die Überlebenden die Opfer und begruben sie innerhalb der zerstörten Stadt.

Dieses Bild eines frühen Kriegs beschwören jüngste Ausgrabungen in Hamoukar herauf – einem Ruinenhügel (Tell) im nordöstlichen Syrien. Seit 1999 arbeiten dort Archäologen des Oriental Institute der Universität Chicago und der syrischen Antikenverwaltung in einem Gemeinschaftsprojekt. Auf einem Areal von 700 Quadratmetern haben meine Kollegen und ich zwei große zerstörte Gebäudekomplexe freigelegt, die jeweils 230 Quadratmeter messen und dem gleichen

Die jüngsten Ausgrabungen auf dem Haupthügel von Hamoukar legten Gebäudekomplexe frei, in denen sich jeweils mehrere einfache Räume und ein dreigliedriges Mittelsaalhaus um einen quadratischen Innenhof gruppierten. Sie wurden bei einem Überfall niedergebrannt und zerstört, der nach Radiokarbondatierungen verkohlter Holzreste etwa 3500 v. Chr. stattfand.

Sturmsaison	1950 – 2000 langjähriges Mittel	2006	2005	2004	1997 extremer El Niño	1955 extreme La Niña
tropische Stürme (Vorhersage Ende Mai)	9,6	10 (17)	28 (15)	15 (14)	8	12
Hurrikane (Vorhersage)	5,9	5 (9)	15 (8)	8 (8)	3	9
starke Hurrikane (Kategorie 3+) (Vorhersage)	2	2 (5)	7 (4)	6 (3)	1	6
summierte Sturmenergie in 10 000 Quadratknoten	87,5 (Median)	78,5	248,9	224,9	40,1	199,0
Anomalie der Oberflächentemperatur im Ostpazifik in Grad Celsius	0	+ 1,1	– 0,7	+ 0,9	+ 2,5	– 2,1
offizielle Todesfälle		17	≥ 2280	≥ 3321	11	≥ 1518
Schäden in Milliarden Dollar		0,5	124	44,9	0,13	8,2

Bautypus angehören: An drei Seiten begrenzen einfache Räume einen quadratischen Hof, an den sich im Norden ein dreigliedriges »Mittelsaalhaus« anschließt.

Das Alter der Ruinen ließ sich durch Radiokarbondatierung verkohlter Holzreste und anderen organischen Materials aus der Brandschicht ermitteln. Demnach ereignete sich der Überfall bereits etwa 3500 v. Chr. – in einer Zeit, als mit dem Aufkommen der frühesten Hochkulturen die ersten Städte der Menschheitsgeschichte entstanden.

Angriff mit Schleudersteinen

Im Brandschutt, der das Gebiet bedeckte, fanden sich über 2300 ovale Schleudersteine aus Ton mit einem Durchschnittsgewicht von 25 bis 30 Gramm. Die Schleuder war eine beliebte Waffe in dieser Zeit (2500 Jahre später streckte David damit Goliath nieder). Sie bestand aus einem einfachen Lederriemen, der die Tonkugeln auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen konnte.

Offenbar bedienten sich auch die Verteidiger dieser Waffe. Ein Indiz dafür lieferte ein flaches Becken im Boden eines der Räume. Eigentlich diente es zum Aufweichen und Aufarbeiten von Siegelton. Doch nun lagen mehrere Schleudersteine aufgereiht an seinem Rand. Demnach scheinen die Bewohner als letztes Mittel sogar noch hastig Geschosse aus Siegelton hergestellt zu haben.

Aber auch den Angreifern ist am Ende wohl die Munition ausgegangen. Darauf deuten über 300 deformierte Schleudersteine aus dem Brandschutt hin, die beim Abschuss noch feucht gewesen sein müssen. Vermutlich wurden sie so kurzfristig angefertigt, dass für ein gründliches Austrocknen keine Zeit mehr blieb.

Schon 1999 hatten wir in Hamoukar Teile einer Stadtmauer aus der ersten Hälfte des 4. vorchristlichen Jahrtausends freigelegt – ein Hinweis auf eine frühe Stadt im Norden Mesopotamiens. Diese Entdeckung erregte damals bereits Aufsehen in der Wissenschaft. Nach den meisten Theorien entstanden die ersten Städte des Nahen Ostens weiter südlich im Zweistromland, wie die Region zwischen den Flüssen Euphrat und Tigris wegen ihrer Lage auch heißt. Dort – im heutigen Irak – ermöglichte der Bewässerungsfeldbau trotz geringer jährlicher Niederschläge eine intensive Landwirtschaft. Die großflächige Kultivierung von Feldfrüchten erforderte jedoch die gezielte Anlage von Kanälen und Dämmen zur Kontrolle der Flutwässer während der Reife- und Erntezeit im April/Mai. Solche Projekte ließen sich nur durch den gezielten, massiven Einsatz ▷

CLEMENS REICHEL

Mehr als 2300 Schleudersteine aus Ton, die in Hamoukar gefunden wurden, zeugen vom Kampf um die Stadt. Einige wurden beim Aufprall deformiert, weil sie kurzfristig hergestellt und noch nicht richtig getrocknet waren. Zwei verformte Geschosse sind in Seiten- und Unteransicht (rechts) gezeigt und einem intakten Exemplar (links) gegenübergestellt.

Hamoukar verfügte über einen bedeutenden Verwaltungsapparat. Das belegt der Fund von Stempelsiegeln wie diesem. Es ist aus Knochen geschnitzt und hat die Form eines kauernden Bären. Das eingekerbte Siegelbild auf der Rückseite zeigt eine menschliche Figur unter einem Tier, möglicherweise einem Gecko.

▷ von Arbeitskräften verwirklichen – was die Entwicklung einer sozial sowie wirtschaftlich differenzierten Gesellschaftsordnung begünstigte.

Überschussproduktion agrarischer Erzeugnisse in den Dörfern und Massenproduktion von Gebrauchsgütern in städtischen Ansiedlungen verstärkten die Aufgabenteilung und damit die ökonomische und soziale Trennung zwischen Stadt- und Landbevölkerung. Groß angelegte Bauvorhaben einer politischen und religiösen Oberschicht zogen weitere Arbeitskräfte an, was einen ausgedehnten Verwaltungsapparat erforderte. So erreichte Uruk im Süden Mesopotamiens schon im späten 4. vorchristlichen Jahrtausend Ausmaße von bis zu 250 Hektar – was mehr als dreißig Fußballfeldern entspricht. Damit war es die größte Stadt der damaligen Welt.

Ganz andere Bedingungen herrschten dagegen im nördlichen Mesopotamien, wo regelmäßige Niederschläge im Winter Regenfeldbau ohne künstliche Bewässerung zuließen. Folglich bestand kein Zwang, die landwirtschaftliche Produktion regional zu organisieren. Das schlug sich in der Siedlungsstruktur nieder, die bis zum heutigen Tag von verstreuten Dörfern geprägt ist. Zwar lässt sich archäologisch in der Frühen Bronzezeit zwischen 2500 und 2200 v. Chr. eine Blüte städtischen Lebens in der Region nachweisen. Bisher galt sie jedoch als Ergebnis einer Expansion der südmesopotamischen Urukkultur, die nach 3500 v. Chr. in Syrien zur Gründung zahlreicher städtischer Kolonien wie Habuba Kabira am Euphrat führte. Überreste einer solchen Urukkolonie finden sich auch in Hamoukar.

Die Stadtmauer gehört jedoch zu Besiedlungsschichten, die in die Zeit um 3700 v. Chr. fallen, also mehrere Jahrhunderte älter sind. Und nicht nur sie allein zeugt vom städtischen Charakter dieser frühen Siedlung. Weitere Belege entdeckten wir in den Gebäudekomplexen, die bei dem eingangs geschilderten Überfall niederbrannten. In den eingestürzten Räumen fanden sich Relikte von einigen hundert Vorratsgefäßen, was auf die Lagerung von Flüssigkeiten – vielleicht Wein oder Öl – sowie die Aufbewahrung von Handelsgütern hindeutet.

Auch zahlreiche Kleinfunde sprechen für eine administrative Funktion dieser Komplexe. Dutzende von Stempelsiegeln in Tierformat und über 1300 Tonklumpen mit Siegelabdrücken, die einst Gefäße, Säcke, Körbe und Türen verschlossen, sind Zeugnisse eines gut organisierten Verwaltungsapparats.

Profitabler Obsidianhandel

Warum aber entwickelte sich Hamoukar so früh zur Stadt? Interessante Aufschlüsse lieferten Grabungen im Herbst letzten Jahres in einem flachen Areal südlich des Haupthügels. Das 280 Hektar große Gebiet barg nicht nur Keramikscherben aus dem späten 5. Jahrtausend v. Chr., sondern war geradezu übersät mit Tausenden von Obsidianfragmenten.

Ganz überwiegend handelte es sich um Splitter und Klingenabschlagskerne, wie sie bei der Bearbeitung dieses glasartigen Gesteins als Abfall entstehen. Die Schlussfolgerung ist klar: Obsidianwerkzeuge wurden damals in Hamoukar nicht nur benutzt, sondern auch hergestellt – und das in großem Umfang.

Der nächste Fundort dieses vulkanischen Gesteins liegt etwa 170 Kilometer nördlich im Gebiet des Nemrut Dag, einem Vulkanmassiv am Vansee in der Osttürkei. Von dort stammen auch, wie chemische Analysen ergaben, die Obsidianwerkzeuge aus südmesopotamischen Fundorten dieser Zeit. Die Lage Hamoukars an einer alten Handelsstraße, die den Tigris beim heutigen Mosul überquert und sich an den Ausläufern des iranischen Zagrosgebirges entlang bis ins südliche Zweistromland hinzieht, ist sicherlich kein Zufall. Sie lässt vermuten, dass die Einwohner Obsidian aus Nemrut Dag bezogen und das damals sehr beliebte Material zu Werkzeugen verarbeiteten, die sie dann in den Süden exportierten.

Auch die Menge der Funde legt das nahe. Zwar nahm die Produktionsstätte sicher nicht das gesamte Fundareal ein, das sogar größer als Uruk ist; vielmehr verlagerte sie sich wohl mit der Zeit von einer Ecke in die andere. Dennoch besteht kein Zweifel, dass die Menge der hier angefertigten Werkzeuge Hamoukars Eigenbedarf weit überstieg.

Dies könnte die Entstehung einer frühen ummauerten städtischen Siedlung in der syrischen Ebene weitab von jeglichem Flusslauf erklären. Eine exportorientierte Wirtschaft hätte einen Anreiz für Teile der Bevölkerung geschaffen, die landwirtschaftliche Eigenproduktion zu Gunsten der Massenherstellung von Gebrauchsgütern aufzugeben. Deren Erlös sorgte für einen wachsenden Wohlstand, den es schließlich gegen Begehrlichkeiten der Nachbarn zu schützen galt. Und so umgaben die Einwohner Hamoukars ihre Stadt mit einer Mauer.

Das gewaltsame Ende konnten sie damit jedoch nicht verhindern. Ein fremdes Monopol auf Herstellung und Vertrieb der wichtigen Obsidianwerkzeuge muss der Urukkultur als Bedrohung erschienen sein. Mit der Expansion nach Norden und Westen um 3500 v. Chr. dürfte sie daher den missliebigen Kontrahenten militärisch ausgeschaltet haben.

Clemens Reichel ist Archäologe am Oriental Institute der Universität Chicago. Seit 2005 leitet er gemeinsam mit Salam al-Kuntar vom syrischen Antikendienst in Damaskus die Ausgrabungen in Hamoukar.

Springers Einwürfe

Johannas falsche Knochen

Die Wahrheit ist manchmal zu viel des Guten.

Als Lohn für die Mühe des Forschens winkt die Freude der Erkenntnis, vom bescheidenen Aha-Erlebnis bis zum ekstatischen »Heureka« des Archimedes, als er in der Badewanne das heute nach ihm benannte Auftriebgesetz entdeckte. Doch Erkenntnis hat auch ihren Preis, denn sie zwingt bisweilen zur Aufgabe vorgefasster Meinungen und lieb gewordener Überzeugungen. So zählte Sigmund Freud seine Entdeckung des Unbewussten zu den drei großen Kränkungen des menschlichen Selbstwertgefühls – nach der kopernikanischen Wende, die den Menschen aus dem Zentrum des Kosmos warf, und der Darwin'schen Evolutionslehre, die ihn als Krone der Schöpfung entthronte.

Weniger einschneidend, aber zumindest für viele Franzosen unliebsam ist nun der Nachweis, dass die Reliquien ihrer Nationalheiligen, der Jungfrau von Orleans, nicht echt sind. Jeanne d'Arc starb 1431 auf dem Scheiterhaufen, und ihre vermeintlichen Überbleibsel wurden im 19. Jahrhundert auf dem Dachboden einer Pariser Apotheke gefunden. Seither sind sie in einem Museum der Erzdiözese Tours zu besichtigen.

In einer wissenschaftlichen Tour de Force hat der Forensiker Philippe Charlier vom Hôpital Raymond-Poincaré in Garches bei Paris die Reliquien jetzt mit ausdrücklicher Billigung der Kirche analysiert und als Fälschung entlarvt. Sogar Duftspezialisten der weltberühmten Parfumindustrie Frankreichs waren an dieser desillusionierenden Entdeckung beteiligt: Ihre feinen Nasen erschnüffelten den Geruch von Vanille – für Charlier ein Indiz, das gegen Verbrennungsrückstände spricht und stattdessen auf Mumifizierung hindeutet *(Nature, Bd. 446, S. 593)*.

Tatsächlich handelt es sich bei den Reliquien zweifelsfrei um Teile einer altägyptischen Mumie, welche – wie die Altersbestimmung per Radiokarbonmethode ergab – schon drei bis sechs Jahrhunderte vor Christi Geburt einbalsamiert wurde. Auf den ersten Blick mag erstaunen, dass in diesem Fall das Fälschungsmaterial fast ein Jahrtausend älter ist als die wohl seinerzeit tatsächlich in alle Winde verstreute Asche des historischen Bauernopfers. Doch laut Charlier wurden Mumienreste im Mittelalter als begehrte Medizin gehortet, und der relativ späte Zeitpunkt der Fälschung passt zur Wiederentdeckung der Heiligen Johanna als nationalreligiöses Symbol der Franzosen im 19. Jahrhundert.

Generell dürfte keine einzige Reliquie, die von Christen verehrt wird – von Kreuzsplittern über das Grabtuch von Turin bis zur Windel des Jesuskinds, die in meiner Wahlheimatstadt Aachen den Pilgern als Höhepunkt der Heiligtumsfahrt vorgezeigt wird – eine so gründliche Prüfung überstehen, wie Charlier sie im Fall der Jungfrau von Orleans durchgeführt hat. Die Frage ist nur, ob die Desillusionierung durch Wissenschaft in solchen Fällen überhaupt einen Sinn hat. Die meisten Gläubigen sehen in diesen Objekten wohl eher Symbole ihres Glaubens, der – anders als ein Gerichtsverfahren, in dessen Verlauf mit Indizien für und wider argumentiert wird – weder diesseitige Beweise braucht noch durch Fälschungsnachweise widerlegt werden kann.

Und sogar in durchaus diesseitigen Belangen erscheint mir fraglich, ob der späte Nachweis einer lange zurückliegenden Täuschung unbedingt nützt oder nicht manchmal sogar Schaden anrichtet. Ein ohne Not – »nur so zur Sicherheit« – durchgeführter Vaterschaftstest kann eine harmonische, gut funktionierende Familie schlagartig ins Unglück stürzen. Da bin ich ausnahmsweise für guten Glauben, nach der Devise: Was ich nicht weiß, macht mich nicht heiß.

Michael Springer

wichtige**online**adressen

Datenauswertung und Messtechnik
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
www.alles-messen.de

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion, Technische
Berechnung, Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Optikentwicklung mit ALOPT 1.0
Design, Analyse und Optimierung
abbildender optischer Systeme
interaktiv und ergonomisch
www.alopt.com

Prometheus Wissenschaftsfernsehen: Livestream in TV-Qualität
Tägliche Wissenschaftsnachrichten,
V-Tipps, TV-Tipps, Reportagen und Dokus
www.prometheus.tv

Consulting für EU-Forschungsanträge im 7. Rahmenprogramm
Energietechnik, Oberflächen,
Superisolationen, num. Modellierung
www.haraldreiss.de

Zahnimplantate Krefeld-Zentrum
Einzelzahnversorgung ab 1000,– Euro
www.michael-eichbaum.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Lausige Zeiten

Was heute auf den Köpfen vieler Kinder krabbelt, ist harmlos – auf das Konto der verwandten Kleiderläuse hingegen gingen in Europa noch im 19. und 20. Jahrhundert Millionen von Toten.

Von Manfred Vasold

Die »guten« alten Zeiten wünscht sich kaum jemand zurück, der sich mit der früheren Lebenssituation der Menschen befasst. »Flöhe und Läuse hatte jeder«, schrieb etwa der französische Gesellschaftshistoriker Emmanuel Le Roy Ladurie über das ausgehende Mittelalter. Dies zu beweisen fällt nicht leicht, denn beim Blick in historische Quellen macht sich derlei Ungeziefer rar. Selbst in der frühen Neuzeit erwähnten die Zeitgenossen die Blut saugenden Parasiten höchst ungern, sei es, dass diese so alltäglich waren, sei es, dass man sich ihrer schämte. Man wollte wohl nicht den Verdacht nähren, selbst ein lausiger Zeitgenosse zu sein. Woher wissen wir dann davon?

Einige Vielschreiber im Zeitalter des Humanismus und der Reformation haben in ihren Aufzeichnungen auch der unliebsamen Körperbewohner gedacht. So schilderte Erasmus von Rotterdam (1466–1536) in seinen Briefen aus England lebhaft, was er an Schmutz und Ungeziefer dort vorfand. Am leichtesten fiel die Erwähnung offenbar stets, wenn man an fremdem Ort darauf stieß – dann konnte man mit einer gewissen Entrüstung über diese Tierchen berichten.

Auch in späteren Jahrhunderten änderte sich daran zunächst nicht viel. Markgräfin Wilhelmine von Bayreuth (1709–1758), die ältere Schwester des Preußenkönigs Friedrich II., schrieb in ihren Erinnerungen über die Ankunft in der fränkischen Residenz und die dortigen Höflinge bissig und nicht ladylike: »Statt der Perücken ließen sie ihre Haare tief ins Gesicht hineinfallen, und Läuse von ebenso alter Herkunft wie sie selbst hatten in diesen Strähnen seit undenklichen Zeiten ihren Wohnsitz aufgeschlagen; ihre sonderbaren Figuren waren mit Gewändern behangen, deren Alter hinter dem der Läuse nicht zurückstand.«

Der schottische Dichter Robert Burns (1759–1796) war so unkonventionell, sogar eine Ode an eine Laus zu verfassen – eine verirrte Kopflaus auf der Haube einer Lady in der Kirche. Und von dem Franzosen Arthur Rimbaud (1854–1891), einem nicht weniger verfemten Dichter und Außenseiter wie Burns, stammt ein erotisches Gedicht über Läusesuche. Hin und wieder hat auch ein Maler festgehalten, wie etwa eine Mutter ihr Kind »entlaust«, ganz selten aber nur, wie jemand Kleiderläusen an den Kragen geht (siehe Abbildung auf S. 26).

Zwicker und Knicker

Bezeichnend für die Verbreitung von Läusen jeglicher Art (siehe Kasten auf S. 27) – und dafür, dass die große Masse der Menschen mit ihnen vertraut war – sind die Eintragungen in den großen Enzyklopädien des 18. Jahrhunderts. Sie bezogen Laus und Floh wie eine Selbstverständlichkeit ein. In Johann Heinrich Zedlers »Universal-Lexicon aller Wissenschaften und Künste«, das in der ersten Hälfte des Jahrhunderts erschien, hieß es gleichsam entschuldigend: »Alle lebendige Geschöpfe ... haben ihre Läuse.« Und die »Oekonomisch-technologische Encyclopädie«, die von Johann G. Krünitz begründet dann in 242 Bänden zwischen 1773 und 1858 erschien, widmete der Laus samt ihrem Anhang nicht weniger als 33 Druckseiten.

Welche Plage das Ungeziefer sein konnte, schilderte der Dichter Ernst Mo-

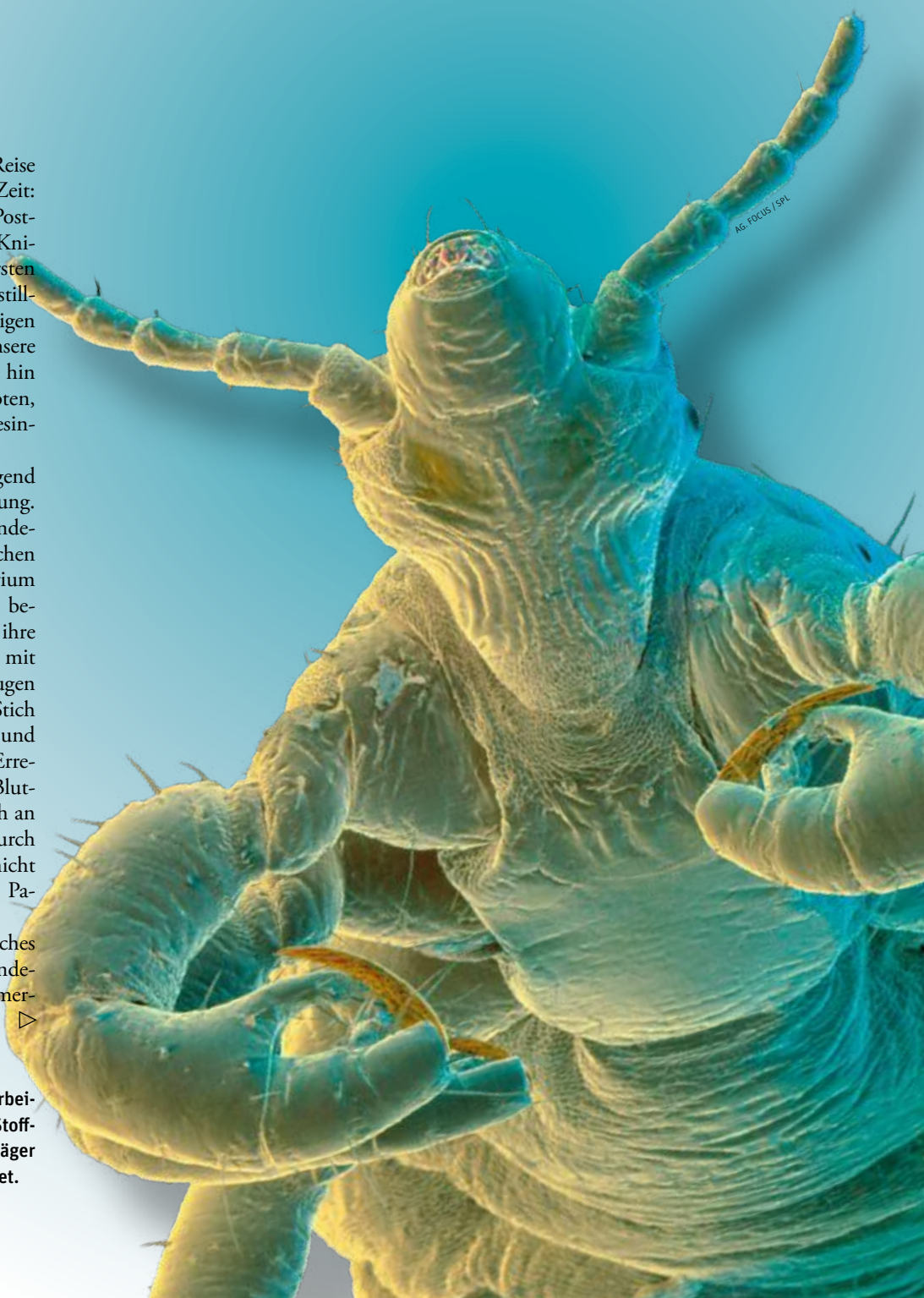
In Kürze

- Wo Menschen auf engstem Raum zusammenleben, **ohne sanitäre Einrichtungen,** und wo sie bei Kälte das Wenige, was sie an Kleidung besitzen, stets auf dem Leib tragen müssen – dort bieten sich **Kleiderläusen** hervorragende Vermehrungsbedingungen.
- Die Blutsauger übertragen mehrere Krankheiten, darunter das **Fleckfieber,** das ohne Antibiotika oft tödlich verläuft.
- In Deutschland verschwanden die großen Fleckfieber-Epidemien erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit **der breit angelegten Hygieneoffensive.** Die seit den 1960er Jahren wieder zunehmenden **Kopfläuse** hingegen übertragen in unseren Breiten keine Krankheiten und sind auch nicht zwangsläufig Zeichen mangelnder Hygiene.

ritz Arndt (1769–1860) von einer Reise durch Russland in napoleonischer Zeit: »Wirklich hatten wir auf einigen Posthalten so viele dieser Zwicker und Knicker aufgelesen, dass wir an dem ersten besten Wäldchen oder Büschchen stillhalten ließen, uns fast bis zur völligen Natürlichkeit entkleideten und unsere Kleider einige Minuten im Winde hin und her schwenkten und ausstäubten, um das stechende und zwickende Gesindel in die weite Welt zu schicken.«

Was heute ziemlich belustigend klingt, war lebenswichtige Vorbeugung. Denn die Kleiderlaus kann unter anderem den Erreger des Epidemischen Fleckfiebers übertragen: das Bakterium *Rickettsia prowazekii*. Die Mikrobe befällt die Darmzellen des Insekts und ihre Nachkommenschaft gelangt dann mit dem Kot, den die Laus beim Blutsaugen absetzt, auf die Haut. Nach dem Stich bildet sich eine juckende Quaddel, und wer kratzt, reibt sich den Kot samt Erreger in die Wunde und somit in die Blutbahn. Anstecken kann man sich auch an geknackten Läusen oder sogar durch Einatmen des verseuchten Kots, nicht aber direkt an einem erkrankten Patienten.

Unbehandelt führt Epidemisches Fleckfieber, dessen Erreger unter anderem Herz und Gehirn schädigt, immerhin bei über 50-Jährigen in bis zu 60 ▷



Mit den Klauen an ihren Klammerbeinen hält die Kleiderlaus sich an Stofffasern fest. Sie ist vor allem als Überträger des Epidemischen Fleckfiebers gefürchtet.

▷ Prozent der Fälle zum Tod, Kinder unter zehn sterben selten daran. Es war und ist eine der großen Seuchen beispielsweise im Gefolge von Kriegswirren – im Dreißigjährigen Krieg (1618–1648) raffte nicht nur die viel bekanntere Pest, sondern auch das Fleckfieber die Menschen dahin. Beide Krankheiten werden von Parasiten übertragen, Erstere von Flöhen und Letztere von Kleiderläusen.

Das Tückische am Fleckfieber ist, dass es noch Jahrzehnte später bei einem scheinbar Gesundeten wieder aufflackern kann, wenn starker Stress oder Hunger das Immunsystem schwächt. Das Opfer wird leicht zum Ausgangspunkt einer neuen Epidemie, wenn gleichzeitig beste Vermehrungs- und Verbreitungschancen für Kleiderläuse bestehen: dort, wo Menschen auf engstem Raum zusammengepfercht leben, keinen Zugang zu sanitären Einrichtungen haben oder aus Armut bei Kälte alles, was sie an Kleidung besitzen, ständig auf dem Leib tragen müssen. Kopfläuse hingegen übertragen in unseren Breiten keine Krankheiten und verbreiten sich selbst unter ganz hygienischen Bedingungen weiter, vor allem unter Kindern.

Vor der großen Hygieneoffensive des späten 19. Jahrhunderts litt noch ein Großteil der Bevölkerung in Deutschland in heute nicht mehr vorstellbarem Maße unter Blut saugenden Schmarotzern. Untrügliche Anzeichen dafür waren vor allem die Fleckfieber-Epidemien: Wo sie grassierten, mussten speziell die Kleiderläuse vorhanden sein, und zwar massenhaft – auch wenn man immer noch eher selten darüber sprach.

Die äußeren Lebensumstände begünstigten die Unsauberkeit und den Befall mit Ungeziefer. Bis zur Reichsgründung 1870/71 verdiente die Mehrheit der Deutschen ihren Lebensunterhalt in der Landwirtschaft. Man lebte in enger Nachbarschaft mit dem Vieh. Die hölzernen Dielen mit ihren Ritzen waren regelrechte Schmutzfallen – und vorübergehende Zuflucht auch für abgefallene oder abgewanderte Kleiderläuse. Das gesamte Bettzeug war sehr viel schlechter als heute zu reinigen. Man schlief auf Strohsäcken, oft zu mehreren. Das gebrauchte Stroh wurde häufig erst ausgewechselt, wenn es schwarz verfault war. Matratzen aus Pferdehaar blieben noch lange eher die Ausnahme. In den Wohnräumen gab es noch kein fließendes Wasser, vielen Menschen mangelte es an Kleidung zum Wechseln, und die Waschgewohnheiten ließen zu wünschen übrig. Ähnliches galt auch für die weniger Begüterten in der Stadt.

»Kein Mensch von Erziehung darf Läuse mit sich führen«

Besonders viele der Plagegeister gediehen stets dort, wo es große Mühe kostete, den Lebensunterhalt zu bestreiten. Innerhalb Deutschlands traf es daher die armen Waldgebirgsregionen mit am härtesten. Nicht zuletzt heißt das Läusefleckfieber auch Hungertyphus. Als im Winter 1847/48 in Oberschlesien eine schwere Fleckfieber-Epidemie grassierte, sandte die preußische Regierung Rudolf Virchow dorthin. Der junge Assistenzarzt, der als Begründer der Zellularpathologie bekannt wurde und politisch für eine Beseitigung des allgemeinen Elends stritt, schilderte später ausführlich die Lebensumstände und die persönliche Hygiene der Bewohner. »Der Oberschlesier wäscht sich im Allgemeinen gar nicht, sondern überlässt es der Fürsorge des Himmels, seinen Leib zuweilen durch einen tüchtigen Regenguss von den darauf angehäuften Schmutzkrusten zu befreien. Ungeziefer aller Art, insbesondere Läuse, sind fast stehende Gäste auf seinem Körper.« (Virchow meinte übrigens noch irrigerweise, Fleckfieber sei eigentlich Bauchtyphus, der ja ebenfalls mit Bewusstseinstrübung und Hautflecken einhergeht.)

Mitte des 17. Jahrhunderts malte Bartolomé Estebàn Murillo diesen Bettlerjungen beim Läuseknacken. Derartige Darstellungen sind rar, aber nicht, weil Läuse so selten waren. »Als Gott Adam schuf, meinte die Laus, er habe es ihretwegen getan«, schrieb der Philosoph und Schriftsteller Fritz Mauthner Anfang der 1920er Jahre.

Anders verhielt es sich bei den gehobenen Schichten, hier galten Läuse schon länger als verpönt. »Niemand schämt sich zu bekennen, daß er Flöhe habe; Läuse hingegen darf kein Mensch von Erziehung mit sich führen, und doch ist beides Ungeziefer und an Geselligkeit geben die Letzteren den Ersteren nichts nach«, schrieb Freiherr von Knigge schon 1788 in seinem berühmten Buch »Über den Umgang mit Menschen«.

Der Oberschicht gelang es früher, nicht zuletzt mit der tätigen Hilfe von Bediensteten, sich vom Ungeziefer zu befreien. Viele derartige Entwicklungen der Vergangenheit begannen am »oberen« Ende der Gesellschaft und setzten sich dann nach »unten« fort. Es ist anzunehmen, dass der einseitige Ungezieferbefall die Spannungen zwischen den sozialen Schichten noch vertiefte. Die Gruppen schotteten sich gegeneinander ab, die ungezieferfreien mieden die läusebehafteten Volksschichten – und entgingen den Epidemien eher.

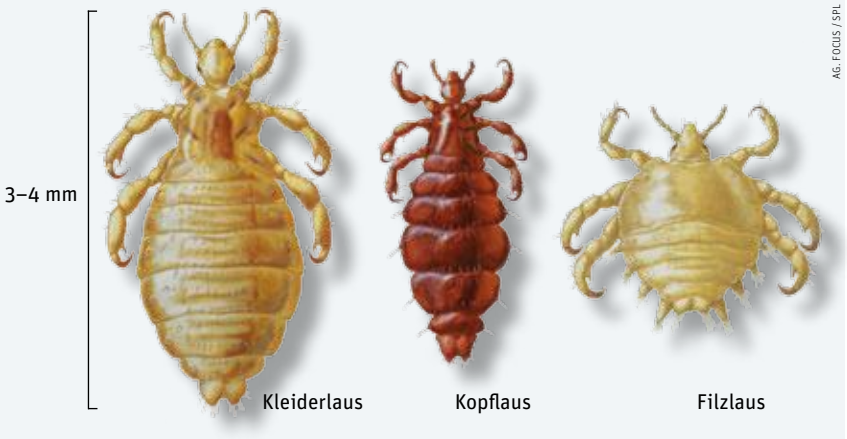
Dies war etwa der Fall, als Napoleons Grande Armée 1813 geschlagen aus Russland floh und die Überlebenden eine schwere Fleckfieber-Epidemie nach Mitteleuropa einschleppten, ein Erbe der verseuchten Kleiderläuse. Johann Heinrich Kopp, Arzt in Hanau am Main, schrieb damals: »Bei den höheren Ständen war die Krankheit seltner; größere Reinlichkeit, Vorsicht vor der Ansteckung, geringere Anhäufung von Menschen in einem Hause, minderer Zulauf aus den niederen Klassen und größere Entfernung von dem Militär schützte sie. Wurden Dienstboten in solchen Häusern krank, so wurden sie häufig außer Haus gebracht und anderwärts gepflegt.«

Tausende auf einem Opfer

In der langen Friedensperiode nach 1815 ebbte das Fleckfieber in Deutschland zwar wieder ab; aber selbst gegen Mitte des 19. Jahrhunderts lagen in Nürnberg, einer Stadt mit damals gut 50 000 Einwohnern, in einzelnen Jahren mehr als einhundert Fleckfieber-Kranke im Krankenhaus, wie ich in den Berichten des Hospitals feststellte. Sicherlich blieben zudem viele weitere Leidende bei sich zu Hause auf ihren verdreckten Strohsäcken. In Wien erkrankten im Winter 1858/59 mehrere tausend Einwohner daran, dies wieder ein deutliches Indiz einer starken Verlausung.

Wenn Läuse in Massen auftreten, können sie aber auch schon schlicht durch den zugefügten Blutverlust schädigen. Man hat bis zu mehrere tausend Exemplare auf einem menschlichen Opfer gezählt. Dieses verspürt so allgemeine Symptome wie Mattigkeit und Reizbarkeit, ist blass und müde wie bei einer aufkommenden Erkältung, während der auftretende Ausschlag an Masern erinnert. In den Akten des Nürnberger Allgemeinen Krankenhauses taucht die moderne Diagnose »Pediculosis« für dieses Krankheitsbild erstmals 1876 auf – vermutlich hatten die älteren Bezeichnungen »Verkratzungen« oder «Juckausschlag« das Gleiche bedeutet. Damals verzeichnete das Hospital 13 Patienten unter dieser Diagnose, sieben Männer und sechs Frauen. Höchstwahrscheinlich ▷

Dreierlei Menschenläuse



Drei Sorten von Läuse waren es, die dem Europäer in der Vergangenheit zu schaffen machten: Kopf-, Filz- und Kleiderläuse. Heute richtet sich die Aufregung zumeist gegen Kopfläuse, wenn diese wieder einmal eine Schulklasse oder einen Kindergarten terrorisieren. Die Bewohner des Haupthaars verbreiten sich zwar wieder zunehmend, übertragen jedoch in unseren Breiten keine Krankheitserreger. Kinder sind erfahrungsgemäß für die Aufnahme anfälliger als Erwachsene, selbst in den Industriestaaten trifft es zwei bis zehn Prozent.

Anders verhält es sich mit der Filz- oder Schamlaus, sie befällt meist Erwachsene, bevorzugt Körperbehaarung, hauptsächlich der Schamregion. Ohne die Möglichkeit, menschliches Blut zu saugen, stirbt sie gewöhnlich binnen eines Tages. An den Saugstellen entstehen bläuliche Flecken. Heute sind Filzläuse selten geworden, selbst große Hautkliniken registrieren oft lange Zeit keinen einzigen Fall.

Als Überträger mehrerer Krankheiten – vor allem von Epidemischem Fleckfieber, Fünftagefieber und Europäischem Rückfallfieber – ist die Kleiderlaus gefürchtet. Deutlich größer als die eng verwandte Kopflaus, erreichen ihre Weibchen fast vier Millimeter Länge. Beim Blutsaugen gibt das Insekt seinen hellroten bis schwärzlichen Kot in perlkettenartigen Schnüren ab. Ist die Kleiderlaus vom Erreger des Fleckfiebers befallen, der sich in ihrer Darmwand vermehrt, so scheidet sie auch ihn mit dem Kot aus. Durch Kratzen oder Einatmen infiziert sich der Mensch.

Die Weibchen legen während der wenigen Wochen ihres Lebens zwei- bis dreihundert Eier, die sie einzeln mit Sekret am liebsten in Nähten oder Falten der Kleidung befestigen, aber auch in Körpergegenden wie der Scham- oder Afterregion. Das angeheftete Gebilde bezeichnet man ebenso wie die leere Hülle nach dem Schlüpfen als Nisse. (Die Kopflaus bringt es auf höchstens halb so viele Eier.)

Die Kleiderlaus lebt am liebsten in der Kleidung, möglichst körpernah bei ihrem Wirt, den sie alle paar Stunden zum Saugen aufsucht, kann sich aber auch für wenige Tage in der nächsten Umgebung einer stark verlausten Person halten, etwa in den früher üblichen Strohsackmatratzen oder in den Ritzen hölzerner Fußbodendielen.

Kochen der Kleidung überstehen weder die Blutsauger noch ihre Eier. Und wo Antibiotika zur Verfügung stehen, lässt sich das Fleckfieber auch behandeln. Ohne die Medikamente sterben bis zu 40 Prozent der Patienten.

Kriegswirren und schlechte hygienische Bedingungen begünstigen den Befall mit Kleiderläusen und damit auch das Auftreten von Fleckfieber-Epidemien. Das rechte Foto zeigt Soldaten, wie sie 1915 an der Westfront Läuse in ihren Hemden knacken, wobei aber Fleckfieber-Erreger frei werden können. Ein fahrbarer Desinfektionsapparat (links) im besetzten Russisch-Polen machte die Kleidung hygienischer ungezieferfrei.

bekamen die Hausärzte, vor allem die auf dem Land, damals weitaus mehr solcher Fälle zu Gesicht.

Für die größeren deutschen Städte war es eine problematische Zeit. Zwischen 1850 und 1880 wuchsen sie sehr rasch, einige verdreifachten in dieser Spanne ihre Einwohnerschaft, auch auf Grund der Landflucht. Die Menschen lebten immer zusammengepferchter auf engstem Raum, oft unter höchst unsauberen Umständen. So verwundert es nicht, dass die allgemeine Sterblichkeit in den Städten nicht zurückging, sondern um diese Zeit erst ihren Höhepunkt erreichte. Ungeziefer hatte Hochkonjunktur. Die städtischen Behörden mussten etwas dagegen unternehmen.

Nun war es nicht einfach, sich sauber und frei von dem Getier zu halten, solange dies allgemein verbreitet war und fließendes Wasser und moderne Bekämpfungsmittel fehlten. »Wo sich Hausungeziefer fand, war man auch damals schon bemüht, dasselbe energisch zu bekämpfen. Aber es fehlte das durchgreifende Mittel des persischen Insektenpulvers. Auch in dem Petroleum ist ein solches Mittel neu erstanden«, schrieb Otto Bähr 1926 in seinem Buch »Eine deutsche Stadt vor hundert Jahren«. Aber Petroleum war außerordentlich teuer und daher nur für eine Minderheit erschwinglich. Und das »persische Insektenpulver« wurde aus bestimmten Chrysanthemenarten hergestellt, die den Wirkstoff Pyrethrum erzeugen. Auch manche heutigen Mittel gegen Kopfläuse enthalten dieses Insektizid.

Nach 1880 begann endlich die organisierte Jagd auf Parasiten. Die Städte richteten jetzt öffentliche Desinfektionsanstalten ein, größere Betriebe auch Waschplätze für ihre Mitarbeiter, und die neue chemische Industrie fing an, synthetische Insektizide herzustellen. Bezeichnenderweise ereigneten sich die letzten größeren Fleckfieber-Epidemien in Deutschland nicht in den Städten, sondern in den armen Waldgebirgen wie der Rhön und in Ostpreußen in den 1880er Jahren. Von da an gelang es, diesen Feind zu besiegen. Die jungen deutschen Ärzte, die 1914 ins Feld zogen, hatten keine Erfahrungen mehr mit Fleckfieber.

Die Kriege des 20. Jahrhunderts verhalfen den Läusen allerdings zu einem Come-back. Im Ersten Weltkrieg wurden die deutschen Soldaten vor allem im Osten, aber auch anderswo heimgesucht (siehe Foto oben rechts). Von den sehr wenigen veröffentlichten Tagebüchern von Frontsoldaten ist das des Elsässers Dominik Richert in dieser Hinsicht besonders aufschlussreich. »Schon in der Nacht wurde ich durch das Beißen wach, wußte aber nicht, daß es Läuse waren, da ich vorher noch nie keine hatte«, schrieb

BEIDE FOTOS: ULLSTEINBILD

er. »Am Morgen gingen wir wieder zu unserer Truppe. Unterwegs biß es mich ganz gewaltig, auf der Brust, ich kratzte drauflos. Aber bald biß es noch mehr. Ich knöpfte nun Mantel, Rock, Unterjacke, Hemd und Finet (gemeint ist das Unterhemd) auf und sah nun die Urheber des Kratzens: Drei Läuse, ganz vollgesogen, saßen auf meiner Brust. Nun zwischen die Nägel, und knacks, hin waren sie. Nun fing es mich an zu beißen: auf dem Rücken, an den Beinen und noch an sonstigen gewissen Körperteilen. Doch das war nur ein ganz kleines Vorspiel von dem, was noch kommen sollte.«

Die Militärbehörden wussten sich zu helfen, sie richteten Entlausungsanstalten ein (siehe Foto oben links). »Ohne den Entlausungsschein durfte kein Soldat in Deutschland einfahren«, schreibt Richert und schildert sodann den Betrieb in einer solchen Anstalt. »Alles befand sich im Adamskostüm ... Nun ging es in den Baderaum. Von oben spritzte das Wasser in mehr als 200 Strahlen hernieder. Jeder stellte sich unter die Brause ... Jeder bekam ein neues Hemd, Unterhosen sowie Strümpfe. Unsere Uniformen waren inzwischen in großen, eisernen Röhren aufgehangen worden, die nun bis zu 90 Grad erhitzt wurden. Die Hitze tötete Läuse und Nissen.«

Obwohl die Entlausungsstationen an der Front gut und wirksam arbeiteten, gelangten doch unzählige Prachtexemplare von Läusen ins Deutsche Reich. Im Winter 1917/18 veröffentlichten deutsche Ärzte, geradezu symptomatisch für solche Zeiten, etliche wissenschaftliche Aufsätze zu zwei Krankheitsformen: Fleckfieber und Geschlechtsleiden. Sich mit Reinlichkeit gegen das Ungeziefer zu wehren, fiel während dieses Kriegs schwer: Seife war streng rationiert; es gab fünfzig Gramm pro Kopf im Monat, und sie war von minderwertiger Qualität.

In den 1920er Jahren war das Fleckfieber in Deutschland kein Problem mehr, aber in Russland starben vor allem im Verlauf des Bürgerkriegs zwischen 1918 und 1922 schätzungsweise zwei bis drei Millionen Menschen daran. Die schwedische Philantrophin Else Brändström, Krankenpflegerin und Delegierte des schwedischen Roten Kreuzes, war maßgeblich an der Versorgung der Kriegsgefangenen in Russland und deren Rückführung beteiligt. Der »Engel von Sibirien« schrieb in seinem Buch bereits über die Zeit zwischen 1914 bis 1920: »In dieser Völkerwanderung entstanden derartig schwere Flecktyphus-Epidemien, dass die Krankenhäuser und öffentlichen Gebäude bei Weitem nicht für die Erkrankten ausreichten. Viele tausende lagen an den Bahnhöfen, auf Straßen und Landwegen und erfroren.« Und weiter: »So wurde ich Zeuge der ›sibirischen Tragödie‹, vielleicht einer der furchtbarsten des Weltkrieges, weil die Opfer von weit über einer Million zum größten Teil nicht kämpfende Männer, sondern Frauen und Kinder waren.«

Reinlichkeit auf dem Stundenplan

In der Zwischenkriegszeit verstanden sich Schule und Wehrmacht in Deutschland auch als Vermittler von Hygiene. Hier hatte man Angehörige des Volkes bis in die unteren Schichten vor sich; hier konnte man die Regeln der persönlichen Reinlichkeit exerzieren. In den Schulen stand »Sauberkeit als Erziehungsziel obenan«, schrieb die Reiseschriftstellerin Edda Neumann, die damals eine Schule in München-Bogenhausen besuchte. »Wir Kinder wurden zum Duschen geführt, nicht etwa nach der Turnstunde, sondern zu einer Art Wasch- und Sauberkeitsunterricht, wie denn überhaupt unsere Lehrer fast täglich die Sauberkeit von Händen und ▷

SV-BILDERDIENST

Gegen Ende des Zweiten Weltkriegs und nach der Kapitulation traten in Deutschland wieder Fälle von Fleckfieber auf. In der Tat hatten staatliche Desinfektionsanstalten, wie hier in Berlin 1946, intensiv gegen Läuse zu kämpfen, vor allem gegen die Bewohner des Haupthaars, aber auch gegen die gefährlichen engen Verwandten in der Kleidung.

▷ Fingernägeln nachprüften, sogar einmal wöchentlich mit festem Griff in jeden Haarschopf fuhr, um nach Kopfläusen zu suchen. Und sie wurden da immer wieder fündig, selbst in diesem Wohnviertel der Gutsituierten.«

Experimente in Buchenwald

Das bürgerliche Deutschland bekam das Problem bald in den Griff; nur besonders problematische Örtlichkeiten – Gefängnisse, Obdachlosenasyle, Schiffe – hatten noch länger damit zu kämpfen. Für die Ausbildung angehender Pflegepersonen beispielsweise war ausdrücklich angeordnet, dass die Referenten »über die Möglichkeit der Krankheitsübertragung durch Läuse und die Bekämpfung der Läuse zu belehren« hatten.

Während des Zweiten Weltkriegs schien die Gefahr durch Kleiderläuse und Fleckfieber im Deutschen Reich dank Vorsichtmaßnahmen zunächst gebannt zu sein; aber gegen Kriegsende tauchte das Ungeziefer und die Krankheit auch innerhalb der Landesgrenzen wieder auf, vor allem dort, wo Menschen unter jämmerlichsten Bedingungen hausen mussten: in den Konzentrations- und den Flüchtlingslagern. (In Buchenwald wurde übrigens mit Fleckfieber-Impfstoffen experimentiert, und man hat isolierte Häftlinge sogar bewusst mit dem Erreger infiziert.) Mit der Kapitulation erlosch jedes staatliche Leben und es kamen selbst in deutschen Städten wieder Fälle von Fleckfieber vor.

Allein die Nürnberger Desinfektionsanstalt befreite von 1946 bis 1948 mehr als 2400 Menschen von Kleiderläusen, 1949 waren es dann nur noch 85. Daneben gab es noch in diesen Jahren mehr als 41 000 Fälle von Kopflausbefall in der fränkischen Stadt. Krankenschwestern, die mit Flüchtlingen zu tun hatten, berichteten entsetzt über die »fetten Biester« von Läusen, die sie bei ihnen gesehen hatten. Je dünner die Menschen, desto dicker die Läuse.

Dann begannen die Zeiten des allgemeinen Wohlstands und der geradezu übertriebenen Sauberkeit. Wer nicht jeden Tag wenigstens einmal duschte und die Kleider wechselte, galt fast schon als »anrüchig«. Nur auf weiten Reisen lernten die Deutschen noch diese Welt von Kleintieren kennen, von denen es in einem alten Vers heißt: »Er reiste in vielen Ländern, / Er schlief in so manchem Haus; / Da hatte er drei Gefährten: / Den Floh, die Wanze, die Laus.«

Für andere Regionen der Erde ist die Gefahr, die von Kleiderläusen ausgeht, keineswegs gebannt. Bezeichnenderweise kam es zum Beispiel Ende der 1990er Jahre auf dem afrikanischen Kontinent im Zuge von Bürgerkriegswirren besonders in den Flüchtlingslagern zu Fleckfieber-Epidemien. In Deutschland hingegen wird nur noch höchst selten eine – eingeschleppte – Erkrankung gemeldet. Kopfläuse jedoch sind seit den 1960er Jahren wie in anderen Industriestaaten wieder im Kommen. Sie werden zunehmend gegen die eingesetzten Insektizide resistent und daher wohl noch länger der Schrecken der Mütter bleiben. ◁

Manfred Vasold arbeitet seit zwanzig Jahren als Publizist mit Schwerpunkt Medizingeschichte. Er studierte Geschichte, Politik und Biologie. 1978 promovierte er in Erlangen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Ratten, Flöhe und die Weltgeschichte. Von Hans Zinsser, Stuttgart 1949

Ungeziefer. Von Albrecht Hase in: Handbuch der Ärztlichen Erfahrungen im Weltkriege 1914/1918. Von Otto von Schjerning (Hg.), Bd. VII: Hygiene, Von Wilhelm Hoffmann (Hg.), Leipzig 1922, S. 417

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872684.

Die Möbiusschleife besitzt nur eine Kante und eine Fläche – ein Sinnbild für ein zuvor kontrahierendes Universum, das kontinuierlich in die heutige Expansionsphase überging.

Ein Kosmos ohne Anfang?

Mit neuen Modellen wagen Theoretiker Aussagen über die Zeit vor dem Urknall. Der Ursprung der Welt wird zum Prüfstein für bestimmte Theorien der Quantengravitation.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

Von Thomas Thiemann
und Markus Pössel

Eine Frage, so alt wie die menschliche Kultur: Gab es die Welt schon immer oder hatte sie einen Anfang? Mit den vielfältigen mythischen Antworten (siehe Kasten auf S. 40) können sich Naturwissenschaftler nicht zufriedengeben. Sie haben in den letzten neunzig Jahren eine Vorstellung von der Entstehung der Welt entwickelt, die auf dem festen Boden der Relativitätstheorie steht und durch zahlreiche Beobachtungen gestützt wird: das Modell eines Universums, das vor knapp 14 Milliarden Jahren aus einem heißen, dichten Zustand entstand und seither stetig expandierte und abkühlte. In den einfachsten Modellvarianten kann man den Anfang der Welt in der heißen Frühzeit bis zu einer »Urknall-Singularität« zurückverfolgen, doch exakt dort stößt die Beschreibung an ihre Grenzen. An der Singularität wäre die Materiedichte unendlich hoch und der Raum unendlich eng zusammengezogen, und damit verliert das Modell seine Grundlage. Die Raum-Zeit-Geometrie, das Fundament von Einsteins Theorie, ist unter solchen Bedingungen nicht mehr definiert.

Eine Alternative bietet seit wenigen Jahren die so genannte Schleifen-Quantenkosmologie *(Loop Quantum Gravity)*: Das Modell eines Kosmos, der schon immer existierte, aber bis vor rund 14 Milliarden Jahren so weit kontrahierte, dass seine Temperatur und Dichte alle jemals gemessenen Werte weit überstiegen – als wäre die Masse der gesamten Erde auf weniger als ein Billionstel eines Billionstels des Volumens eines Atomkerns zusammengepresst. Während das Volumen jeder beliebigen Raumregion auf null sank, wuchs die Dichte der darin enthaltenen Materie nicht über alle Grenzen an, sondern fiel – aller Anschaulichkeit zuwider – ebenfalls auf null ab. Unmittelbar darauf kehrte sich der Prozess um: Eine Expansionsphase begann, in der die Dichte zunächst wieder anstieg, bald aber wie gewohnt begann, mit zunehmender Ausdehnung abzufallen. Dann erst setzte die Entwicklung ein, die das Standardmodell der Kosmologie beschreibt: Ein stetig ausdünnendes, abkühlendes Universum, in dem sich 400 000 Jahre später Atomkerne und Elektronen zu elektrisch neutralen Atomen verbinden und die kosmische Hintergrundstrahlung freisetzen; stetig verklumpende Materie, die schließlich jenes komplexe Netz von Galaxienhaufen bildet, das wir heute beobachten (siehe SdW 4/2007, S. 32).

Für den Augenblick des Urknalls brechen Modelle der klassischen Kosmologie zusammen: Raum und Zeit sind nicht definiert

Kollaps und anschließende Expansion des Kosmos – dieses Szenario stellt die weit verbreitete Vorstellung vom Urknall als Anfang der Welt in Frage. Es beruht auf Arbeiten, die der junge theoretische Physiker Martin Bojowald, damals an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen, seit dem Jahr 2000 veröffentlichte – die erste kosmologische Anwendung der Theorie der Schleifen-Quantengravitation, die vielen Physikern als aussichtsreicher Wegbereiter einer umfassenden Beschreibung von Gravitation und Quantenwelt gilt. Allerdings musste Bojowald, der heute an der Pennsylvania State University in University Park arbeitet, die Zulässigkeit wesentlicher mathematischer Vereinfachungen, auf denen das Modell beruht, ohne Beweis voraussetzen. Zumindest einige dieser Vereinfachungen konnten seine Kollegen Abhay Ashtekar, Parampreet Singh und Tomasz Pawlowski Anfang 2006 begründen und so das Modell auf solidere Füße stellen.

Diese Arbeiten markieren den aktuellen Stand einer Entwicklung, die 1917, im Geburtsjahr der modernen Kosmologie, ihren Anfang nahm. Damals erschien in den »Verhandlungen der preussischen Akademie der Wissenschaften« ein Beitrag, in dem der 37-jährige Albert Einstein erstmals zeigte, wie die Allgemeine Relativitätstheorie – seine zwei Jahre zuvor vollendete Beschreibung von Raum, Zeit und Gravitation – auf das Universum als Ganzes anzuwenden ist.

In einer Hinsicht ließ sich Einstein von den Denkgewohnheiten seiner Zeit leiten. Kaum jemand bezweifelte damals, der Kosmos sei statisch, also im Ganzen zeitlich unveränderlich. Um solch ein Universum beschreiben zu können, modifizierte Einstein die ursprünglichen Gleichungen, indem er eine »kosmologische Konstante« einführte. Sie liefert eine dem Raum innewohnende, universelle Abstoßung, die der gegenseitigen Anziehung der im All vorhandenen Massen exakt die Waage hält.

Mit der Festlegung auf ein statisches Weltall entging Einstein eine einzigartige Vorhersage. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ein expandierender oder kollabierender Kosmos viel

In Kürze

- Zahlreiche Beobachtungen stützen das Urknallmodell, dem zufolge die Welt aus einem **heißen, dichten Anfangszustand** hervorging und durch die Expansion des Raums abkühlte. Für den Ursprungsmoment führt es allerdings zu einer Singularität – einem Zustand unendlicher Temperatur, Dichte und Raumkrümmung. Das ist physikalisch unmöglich.
- Bisherige Versuche, diesen Zustand zu umgehen, machen Annahmen, die kaum überprüfbar sind. So schlägt die Stringtheorie unter anderem vor, unser Universum könne aus der **Kollision zweier Paralleluniversen** entstanden sein.
- Die Modelle der Schleifen-Quantenkosmologie beschreiben konsistent, wie ein existierendes Universum **kollabiert und anschließend expandiert**, ohne dass es zwischendurch zu einer Singularität kommt. Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung könnten schon bald Hinweise für diese Entwicklung liefern.

naheliegender. Hätte Einstein ein solches veränderliches Universum postuliert, wäre er zwölf Jahre später auf dramatische Weise bestätigt worden. Bereits 1929 erkannte Edwin Hubble vom Mount-Wilson-Observatorium bei Los Angeles auf Grund eigener Beobachtungen und solcher seines Kollegen Vesto Slipher vom Lick-Observatorium bei San Francisco, dass sich unser Kosmos tatsächlich ausdehnt.

In den folgenden Jahrzehnten diskutierten Kosmologen über zwei Weltmodelle, welche auf die Frage nach dem Anfang der Welt gegensätzliche Antworten lieferten. Der Urknalltheorie zufolge, die auf Arbeiten des russischen Mathematikers und Physikers Alexander Friedmann und des belgischen Physikers und Priesters George Lemaître aus den 1920er Jahren zurückgeht, entstand die Welt aus einem stark verdichteten, energiereichen »Uratom«, das abrupt zu expandieren begann. Als Alternative schlugen Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle 1948 die Steady-State-Theorie vor, die ein Universum postuliert, das trotz stetiger Expansion im Durchschnitt unveränderlich ist und weder Anfang noch Ende hat. Das Absinken der Massendichte auf Grund der Expansion wird ausgeglichen, indem im intergalaktischen Raum fortwährend neue Materie entsteht.

Beweise für die heiße Frühzeit

Nicht einmal zwei Jahrzehnte später gelang es, mit Hilfe astronomischer Beobachtungen zwischen den beiden Modellen zu entscheiden: Die Verteilung von Radiogalaxien, die gemessene Häufigkeit leichter chemischer Elemente sowie die 1965 entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung stimmen mit den Vorhersagen des Urknallmodells überein, nicht aber mit denen der Steady-State-Theorie. Seither haben zahlreiche weitere Messungen das Bild eines heißen, dichten Anfangszustands mit anschließender Expansion, Abkühlung und Stukturbildung immer weiter untermauert.

Auch wenn das Urknallmodell im Einklang mit den Beobachtungen steht: Stößt man weit genug in die Vergangenheit vor, kommen immer größere Unsicherheiten ins Spiel. Immerhin: Bereits eine millionstel Sekunde nach dem Urknall war der kosmische Materie-Inhalt so weit verdünnt und abgekühlt, dass die vorherrschenden Energien im Gültigkeitsbereich experimentell gut überprüfter Theorien der Teilchen- und Kernphysik liegen. Bis in eine Zeit vor der ersten milliardstel Sekunde können die Physiker die bekannten Naturgesetze extrapolieren; darauf fußt insbesondere die Vorhersage der so genannten Inflationsphase, einer äußerst kurzen Phase dramatisch beschleunigter Expansion, die sich als Teil des kosmologischen Standardmodells etabliert hat und für die jüngst Präzisionsmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung erste Belege liefern konnten (siehe SdW 5/2004, S. 46).

Dann jedoch ist die Singularität erreicht – üblicherweise als Anfang des Universums gedeutet, in einigen früheren Modellen aber auch als Zwischenstadium eines zyklischen Universums, das sich immer wieder ausdehnt, dann auf Grund seiner hohen Massendichte wieder kollabiert, um anschließend in eine neue Expansionsphase einzutreten. Doch wie immer man sie einordnet: An der Singularität stößt das Modell an seine Grenzen – die Geometrie der Raumzeit lässt sich dort nicht vernünftig definieren.

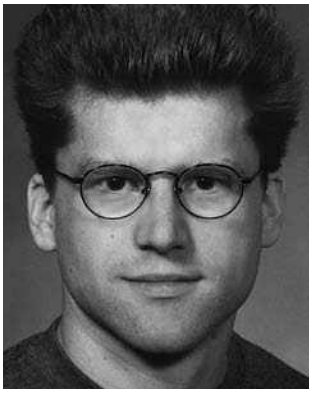
Das Problem ist recht offensichtlich: Einsteins Beschreibung lässt Effekte der Quantentheorie außer Acht, der zweiten Säule der modernen Physik. Von Festkörpern, Molekülen, Atomen und Elementarteilchen wissen wir aber, dass Quanteneffekte auftreten, wenn es um mikroskopische Größenskalen und extrem hohe Energien geht. Wenn uns das Urknallmodell schon keine gesicherten Erkenntnisse zum eigentlichen Weltanfang bietet, so sagt es uns zumindest, wie wir danach suchen sollten: mit Hilfe einer Theorie der Quantengravitation, die sowohl die Gravitation als auch die Gesetze der Quantenwelt berücksichtigt und uns deswegen eine gültige Beschreibung des frühen, extrem dichten Universums liefern könnte.

Allerdings gelang es den Forschern in den letzten sechzig Jahren trotz intensiver Bemühungen nicht, Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie zusammenzubringen – Erstere mit ihrer ungewohnten Welt der Wahrscheinlichkeiten, Letztere mit ihrem Verzicht auf eine »starre Bühne« von Raum und Zeit – und sie zu einer tragfähigen und vollständigen Theorie der Quantengravitation zu verbinden. Doch immerhin gibt es bei diesem Vorhaben ▷

James Hartle

Stephen Hawking

Lee Smolin

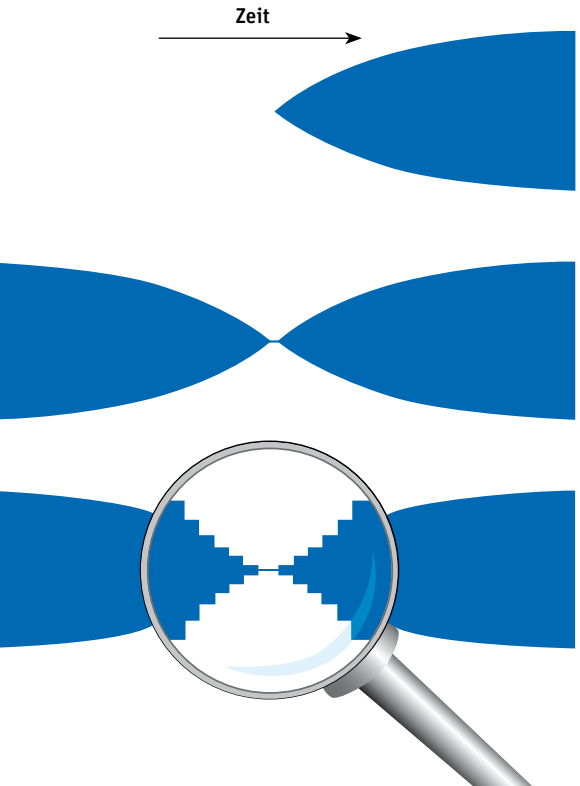


Martin Bojowald

beachtliche Fortschritte – wenn auch nicht in einer einheitlichen Richtung, sondern im Rahmen verschiedener, konkurrierender Ansätze.

Auch mit kosmologischen Anwendungen haben sich die Forscher auf ihrer Suche nach der Quantengravitation immer wieder beschäftigt. Bereits 1983 formulierten James Hartle von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und Stephen Hawking von der Universität Cambridge eine Quantenkosmologie, die auf der so genannten Feynman-Formulierung der Quantentheorie beruht. Darin ergibt sich der heutige Zustand des Universums aus einer Summe aller »Geschichten« – das sind alle möglichen Entwicklungen, die zu diesem Zustand hätten führen können. Bemerkenswert ist, dass die Zeit in dieser Beschreibung für das früheste Universum die Eigenschaft einer Raumdimension annimmt. Auch wenn man die Modelluniversen nicht unendlich weit in die Vergangenheit zurückverfolgen kann, lässt sich kein Rand oder Anfang identifizieren – so wie es auch auf einer Kugelfläche keinen Punkt gibt, von dem die Fläche ihren Anfang nimmt. Dieser Ansatz bringt eigene Probleme mit sich. So ist umstritten, inwieweit man die in der Elementarteilchenphysik üblichen Methoden für die Berechnung solcher Summen auf Einsteins gekrümmte Raumzeit übertragen kann.

Im herkömmlichen Urknallmodell beginnt die Geschichte des Universums mit einer Singularität. Es folgt eine Expansion, die bis heute andauert (oben). In Modellen der Schleifen-Quantengravitation stellt der Urknall nur ein Zwischenstadium dar. Ein bereits existierendes Universum zieht sich zusammen, erreicht einen Wendepunkt und dehnt sich anschließend wieder aus (Mitte). In der Nähe des Wendepunkts lässt sich die Zeitentwicklung nicht mehr mit den klassischen Begriffen von Raum und Zeit beschreiben – stattdessen verändern sich dort Zeitschritt für Zeitschritt die Eigenschaften eines Quantenraums, hier durch die Stufenform angedeutet (unten).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Einer der gegenwärtig beliebtesten Ansätze für eine Theorie der Quantengravitation, die Stringtheorie, liefert gleich mehrere Szenarien für den Beginn des Universums. Sie setzt voraus, dass Teilchen, welche die herkömmliche Elementarteilchenphysik als ausdehnungslos betrachtet, tatsächlich winzige schwingende Saiten sind (siehe SdW 8/2004, S. 30). Zwischen den verschiedenen Varianten der Stringtheorie gibt es überraschende mathematische Wechselbeziehungen, so genannte Dualitäten. So kann etwa eine bestimmte Sorte von weit ausgedehntem Universum komplett äquivalent sein zu einem, das auf submikroskopisch kleine Abstände zusammengezogen ist. Mit Hilfe solcher Entsprechungen lässt sich ein Szenario beschreiben, in dem ein unendlich ausgedehntes, unendlich altes Universum kollabiert und – sobald eine gewisse Grenzdichte erreicht ist – aus einer heißen, dichten Anfangsphase heraus zu expandieren beginnt.

Andere kosmologische Modelle der Stringtheorie beschreiben einen dreidimensionalen Kosmos als eine Untermenge eines Universums mit mehr als drei Dimensionen, ähnlich wie eine zweidimensionale Fläche – man denke an ein Blatt Papier – in den dreidimensionalen Raum eingebettet sein kann. Kollidiert unser eigenes Universum mit einem weiteren oder kollidieren zwei Nachbaruniversen in der Nähe unseres eigenen, kann dies ebenfalls die dichte, heiße Anfangsphase unseres Alls oder eine Inflationsphase einleiten (siehe SdW 8/2001, S. 12). Andere Modelluniversen der Stringtheorie ähneln dem eingangs angesprochenen Bojowald-Szenario und kontrahieren, bis bestimmte Eigenschaften des Weltalls für einen Rückprall sorgen und eine Ausdehnungsphase einleiten. Allerdings gehen in diese Modelle bislang noch eine Reihe von Zusatzannahmen ein. Weiterer Grund zur Skepsis sind für viele Kosmologen unbewiesene Grundannahmen der Stringtheorie selbst, etwa über die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen, für die es derzeit keinerlei experimentelle Hinweise gibt.

Schleifen der Raumzeit

Könnte es auch mit weniger Hypothesen gelingen, Aussagen über den Anfang des Universums zu treffen? Dies verspricht die Schleifen-Quantengravitation, auf der auch Bojowalds Arbeit beruht. Dieser Ansatz soll die in der Allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Geometrie der Raumzeit mit den grundlegenden Konzepten der Quantenphysik in Einklang bringen und geht dabei allein von empirisch gesicherten Annahmen aus – in der Hoffnung, daraus möglichst allgemein gültige Eigenschaften ableiten zu können, die jede Theorie der Quantengravitation aufweisen sollte.

Ihren Namen verdankt die Schleifen-Quantengravitation einer Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die der indisch-amerikanische Physiker Abhay Ashtekar 1986 vorschlug und die in vieler Hinsicht Maxwells Theorie des Elektromagnetismus ähnelt. Von dieser übernimmt sie das Konzept der Feldlinien, die man etwa als Magnetfeldlinien kennt, die den Nord- und Südpol eines Stabmagneten verbinden.

Sowohl in der Maxwell-Theorie als auch in verwandten Theorien wie der Quantentheorie der starken Kernkraft, der so genannten Quantenchromodynamik, sind unter anderem geschlossene Feldlinien wichtig. Die Bedeutung solcher geschlossenen Feldlinien für die Ashtekar-Formulierung der Gravitation erkannten zuerst die Physiker Theodore Jacobson von der Universität Maryland, Carlo Rovelli, der heute an der Universität von Marseille arbeitet, sowie Lee Smolin, heute am Perimeter-Institut in Waterloo (Kanada). Die Schleifen erweisen sich als mikroskopische Grundbausteine des Raums, die so genannte Spin-Netzwerke bilden – Ensembles unvorstellbar vieler Schleifen, die sich an zahlreichen Orten schneiden (siehe SdW 3/2004, S. 54). Ein derartiges Netzwerk aus Punkten ▷

»Quantenfedern statt Urknall«

Abhay Ashtekar, Direktor des Instituts für Gravitationsphysik und Geometrie der Pennsylvania State University in University Park, ist ein Mitbegründer der Theorie der Schleifen-Quantengravitation, die neben der Stringtheorie gegenwärtig der aussichtsreichste Ansatz für eine Theorie der Quantengravitation ist. Gemeinsam mit seinen Kollegen Parampreet Singh und Tomasz Pawlowski gelang es ihm Anfang 2006, ein Modell für die Zeit vor dem Urknall zu verbessern, das Martin Bojowald in den letzten Jahren entwarf.

Abhay Ashtekar

Können Sie Ihren Ansatz in einfachen Worten beschreiben?
In der Schleifen-Quantengravitation sind sowohl die Materie als auch die Geometrie der Raumzeit der Quantenmechanik unterworfen. Das Raum-Zeit-Kontinuum ist nur eine Näherung. Sie können es sich wie einen Stoff vorstellen, der aus eindimensionalen Quantenfäden gewoben ist. Dieses Gewebe ist so fein, dass es uns wie ein Kontinuum erscheint. Unter extremen Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten, zerreißt es. Wir können es dann nicht mehr als Kontinuum beschreiben, sondern müssen das Schicksal einzelner Quantenfäden berechnen. Deren Verhalten wird durch die Einstein-Quantengleichungen bestimmt, die aus der Schleifen-Quantenkosmologie abgeleitet wurden, einer Theorie, die entsteht, wenn man die Schleifen-Quantengravitation auf symmetrische kosmologische Probleme anwendet.

Welche Aussage trifft Ihre Theorie über den Urknall?
Beginnen wir mit Verhältnissen, die unserem heutigen Universum entsprechen, und rechnen in die Vergangenheit zurück, verraten uns die Gleichungen, dass eine völlig neue abstoßende Kraft aufkommt. Diese wird extrem stark, sobald die Dichte der Materie einen Wert von etwa 10^{94} Gramm pro Kubikzentimeter übersteigt, die so genannte Planckdichte. Diese Kraft übertrifft die Gravitation und bringt das Universum dazu zu expandieren. Anstelle eines Urknalls gäbe es demzufolge ein »Quantenfedern«. Wenn wir in der Zeitnoch weiter zurückgehen, dann finden wir ein Prä-Urknall-Universum, das kontrahiert.

Sind in der Physik ähnliche Phänomene bekannt?
Es gibt eine Analogie zum Lebensende massereicher Sterne. Haben diese ihren nuklearen Brennstoffvorrat verbrannt, kollabieren sie auf Grund der Gravitationskraft. Der klassischen Physik zufolge würde sich der Kollaps fortsetzen, bis der gesamte Stern auf ein winziges Volumen zusammengepresst ist. Dazu kommt es jedoch nicht, weil Quanteneigenschaften der Materie bedeutsam werden. Das geschieht nach dem so genannten Pauli-Prinzip, das den gleichen Effekt wie eine abstoßende Kraft hat, die den Kollaps stoppt, sobald die Materie die Dichte von Atomkernen aufweist.

Auch in der Stringtheorie gibt es ein Prä-Urknall-Szenario. Worin unterscheidet es sich von Ihrem Modell?
Im Gegensatz zu unserem Modell gibt es in der Stringtheorie keine Rechnung, welche die Zeit vor dem Urknall mit der danach konsistent verbindet. Das liegt daran, dass ihre Gleichungen eine kontinuierliche Raumzeit voraussetzen, doch diese bricht beim Urknall zusammen.

Könnte es Spuren früherer Universen geben, die noch heute erkennbar sind?
Das ist eine spannende Frage und ich denke, die Antwort ist ja. Ein Prä-Urknall-Universum würde zum Beispiel das Horizontproblem lösen. Das ist das Rätsel, warum die kosmische Hintergrundstrahlung so homogen erscheint, obwohl es kurz nach dem Urknall keine kausalen Beziehungen zwischen Raumgebieten gab, die wir in anderen Richtungen am Himmel sehen – selbst die Lichtgeschwindigkeit wäre dafür zu langsam gewesen.

Womöglich kann die Quantengravitation erklären, warum die Hintergrundstrahlung deutlich weniger Leistung auf großen Winkelskalen enthält, als das gegenwärtige Standardmodell der Kosmologie vorhersagt. Mit genaueren Messdaten könnte man die Theorie überprüfen. Das wird aber noch eine Weile dauern. Bis dahin sind die interessantesten Fragen theoretischer Natur.

Welche Fragen sind das?
Wird die Schleifen-Quantenkosmologie in der Lage sein, detailliert und widerspruchsfrei Szenarien der Inflation zu beschreiben, als das Universum kurz nach dem Urknall dramatisch expandierte? Produzieren ihre Gleichungen ein Bild, das unser Universum von damals bis heute zutreffend beschreibt? Auf solche Fragen konzentrieren wir uns gegenwärtig. Eine stimmige Theorie zu finden, die nicht beim Urknall zusammenbricht und die großen Strukturen des heutigen Universums erklärt, wäre schon ein Triumph.

Die Fragen stellte **Emanuela Buyer**. Sie ist Referendarin für Physik und Mathematik an einem Gymnasium in Singen sowie freie Wissenschaftsjournalistin.

▷ (Vertizes), die durch Kanten verbunden sind, bezeichnen Mathematiker als Graphen. Um den Zustand des Gravitationsfelds zu beschreiben, wird jeder Kante eine Zahl zugeordnet, ein ganzzahliges Vielfaches von 1/2. Diese kodiert eine Eigenschaft, die man bei den Elementarteilchen der herkömmlichen Quantentheorien als »Spin« bezeichnet – eine Quantenversion des Drehimpulses.

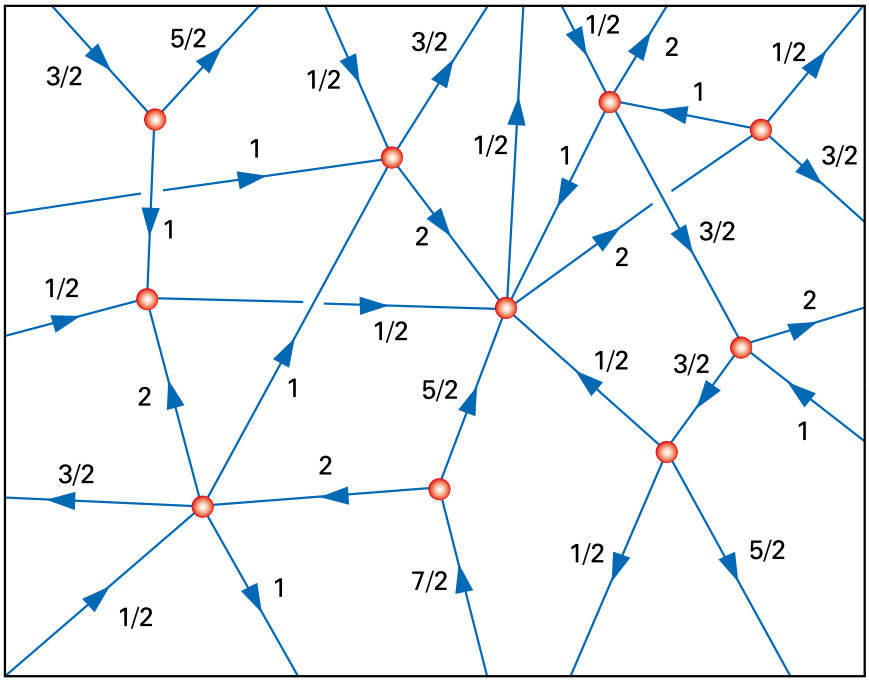
Der zum Spin-Netzwerk gehörige Raum wird konstruiert, indem man zu jeder Kante eine Fläche wählt, die nur diese und keine andere Kante des Netzwerks schneidet. Untereinander schneiden sich diese Flächen nicht; ihre Ränder sind allerdings so verklebt, dass eine dreidimensionale Wabenstruktur entsteht. Das Bild auf der gegenüberliegenden Seite stellt einen Raum dar, der auf diese Weise aus Elementarflächen zusammengesetzt ist. Der Flächeninhalt jeder der Teilflächen ist das Produkt der Spin-Zahl, die der entsprechenden Kante zugeordnet ist, mit einer winzigen Elementarfläche, die sich als Kombination der grundlegenden Naturkonstanten von Relativitätstheorie und Quantentheorie ergibt, der so genannten Planckfläche von 10^{-66} Quadratzentimetern. Wenn wir der Einfachheit halber annehmen, dass die Kanten sämtlich die Spin-Zahl 1 tragen, dann würde man etwa 10^{68} Schleifen benötigen, um die Geometrie eines Blatts Schreibmaschinenpapier zu konstruieren!

Dass Raum und Zeit nicht beliebig teilbar sind, sondern sozusagen aus »Atomen«, also unteilbaren Einheiten, bestehen, vermuten manche Physiker schon seit Längerem (siehe SdW 4/2006, S. 40). Aus der Schleifen-Quantengravitation ergibt sich diese Quantelung auf natürliche Weise: Eine Fläche wie die des erwähnten Blatts Papier lässt sich nicht unendlich fein zerteilen, sondern allenfalls in Stücke, die jeweils die Größe der Planckfläche aufweisen.

Wer ein expandierendes, kollabierendes oder sonstwie zeitlich veränderliches Universum beschreiben will, muss wissen, wie sich die Raumgeometrie mit der Zeit ändert. Die Zeitentwicklung der Spin-Netzwerke wird durch eine Quantenversion von Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie bestimmt; dieser erstmals von Thomas Thiemann abgeleiteten Dynamik zufolge vergeht die Zeit diskret, wobei jeder Schritt der Dauer der so genannten Planckzeit von 10^{-43} Sekunden entspricht. Schritt für Schritt ändern sich die Spin-Zahlen auf den Netzwerkkanten nach bestimmten Regeln – sie bleiben entweder gleich, werden um 1/2 größer oder um diesen Betrag kleiner.

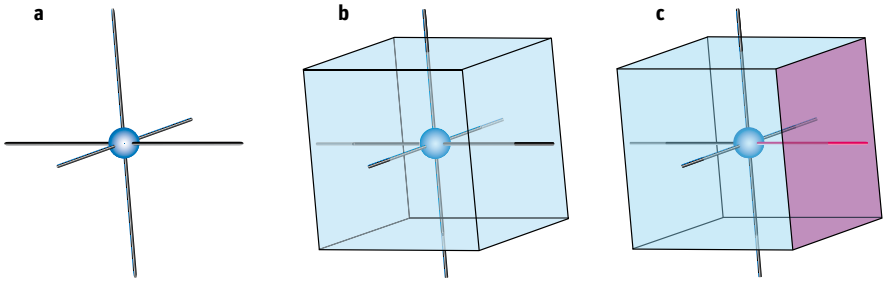
Nimmt eine Spin-Zahl den Wert null an, verschwindet die entsprechende Kante. Umgekehrt können Kanten aus dem Nichts entstehen, wobei »Nichts« hier keineswegs für den materiefreien Raum des Vakuums steht. Vielmehr ergibt sich in diesem Fall eine neue Raumregion, wo vorher nur Raum geringeren Volumens existierte. Das Spin-Netzwerk liegt demzufolge nicht »im Raum«, sondern es ist der Raum selbst. Jegliche Materie kann nur auf seinen Kanten oder Vertizes existieren. Indem die Schleifen-Quantengravitation eine Quantenversion des Raumes definieren und zudem angeben kann, wie

Ausschnitt aus einem Spin-Netzwerk: Es besteht aus Knotenpunkten (rot) sowie Linien, die in bestimmter Richtung von einem Knotenpunkt zu einem zweiten führen (blau). Jeder Linie ist ein Spin-Wert zugeordnet – ein ganzzahliges Vielfaches von 1/2. Jedem Knotenpunkt ist ebenfalls ein Zahlenwert zugeordnet (hier nicht gezeigt).



ABBILDUNGEN DIESER SEITE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Spin-Netzwerke definieren einen aus elementaren Bausteinen konstruierten Raum. Hier ist der anschaulichste Fall dargestellt, ein Knoten mit sechs angrenzenden Linien (a). Dieser Ausschnitt definiert eine würfelförmige Raumregion (b). Jeder der Linien entspricht diejenige Würfelfläche, die von der Linie durchstoßen wird; ein Beispiel ist in (c) zu sehen (rote Linie durchstößt rote Fläche). Der Flächeninhalt einzelner Würfelflächen lässt sich nicht aus der Abbildung erschließen, sondern ergibt sich aus dem Spin-Zahlenwert, welcher der betreffenden Linie des Spin-Netzwerks zugeordnet ist. Das Volumen des Würfelbausteins ergibt sich aus dem Zahlenwert, der zum betreffenden Knotenpunkt gehört.



sich dieser Raum mit der Zeit verändert, scheinen gute Voraussetzungen gegeben zu sein, um ein entsprechendes kosmologisches Modell zu formulieren. Doch leider sind die Quanten-Einsteingleichungen der Schleifen-Quantengravitation höchst kompliziert. Wer daraus zu physikalischen Erkenntnissen kommen will, muss – zum Teil drastisch – vereinfachen.

Die wesentliche Vereinfachung, die Martin Bojowald vornahm, beruht auf Symmetrieannahmen, wie sie auch den klassischen kosmologischen Modellen zu Grunde liegen – dem Bild einer Welt, die homogen und isotrop ist, mit anderen Worten: für jeden Beobachter dieselben Eigenschaften aufweist, egal wo sich dieser befindet und in welche Richtung er schaut. Diese Annahme schränkt die Dynamik eines Modelluniversums stark ein. Während die zeitliche Entwicklung der Materiedichte in einem inhomogenen Kosmos für jeden Punkt im Raum einzeln verfolgt werden muss, reicht es im homogenen Fall aus, die Evolution eines einzigen Werts zu beschreiben, die der mittleren Dichte. Dank solcher Vereinfachungen konnte Bojowald die Entwicklung seines Modelluniversums tatsächlich Zeitschritt für Zeitschritt berechnen. Sein Ergebnis ist das eingangs beschriebene Szenario, mit dem er die Schleifen-Quantenkosmologie *(Loop Quantum Cosmology)* begründete.

MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATION

Diese Visualisierung des gequantelten Raums ordnet jeder Elementarfläche eine Farbe zu. Diese ist gemäß des Spin-Werts der entsprechenden Spin-Netzwerk-Kante kodiert und orientiert sich an der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Große Flächen (mit großem Spin-Wert) sind violett, kleine rot dargestellt. Das eigentliche Spin-Netzwerk ist nicht gezeigt. Was hier wie leerer Raum zwischen den Teilflächen aussieht, hat tatsächlich weder Volumen noch Flächeninhalt; dort ist kein physikalischer Raum definiert.

Ungewisse Vereinfachungen

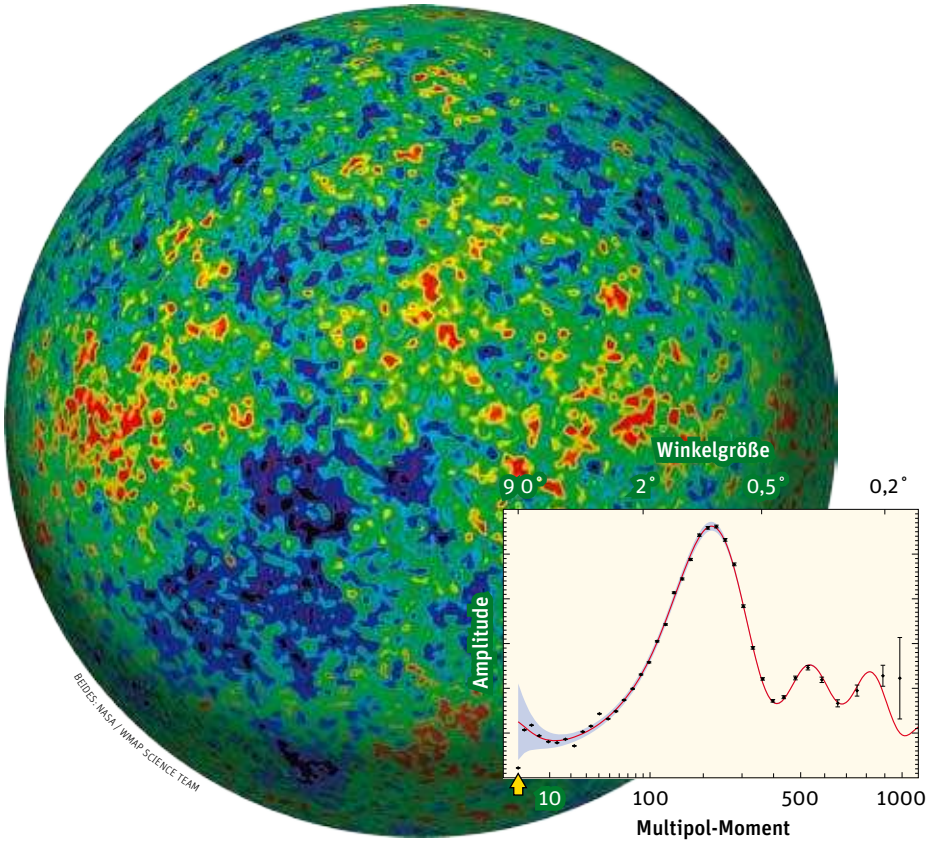
In der kritischen frühesten Phase, die in den klassischen Modellen mit der Urknallsingularität beginnt, tritt im Schleifen-Modell die durch Spin-Netzwerke beschriebene Quantengeometrie in den Vordergrund. Die Entwicklung lässt sich mit dem herkömmlichen Raumbegriff nicht beschreiben. Zwar schrumpft das Volumen des Universums in dieser Phase auf null, doch ohne dass seine Dichte ins Grenzenlose steigt. Eine Singularität tritt nirgends auf. Damit erfüllt das Modell eine lang gehegte Hoffnung der Theoretiker.

Abhängig von seinem Gehalt an Materie und Energie setzt ein solches Modelluniversum seine Expansion immer weiter fort – was für unser Universum zu gelten scheint – oder es kollabiert nach langer Zeit erneut. Demnach gäbe es keinen Anfang der Welt. Das Universum hätte schon immer existiert.

Allerdings hatte Bojowald mit seinen Arbeiten noch nicht gezeigt, inwieweit die grundlegenden Vereinfachungen des Modells tatsächlich zulässig sind. Dass ein Universum nicht auf Dauer vollkommen homogen sein kann, folgt aus dem so genannten Unschärfeprinzip der Quantentheorie. Diesem zufolge ist es beispielsweise unmöglich, den Ort eines Teilchens exakt zu bestimmen und gleichzeitig die Änderungsrate dieses Orts, also die Teilchengeschwindigkeit, exakt auf null zu halten. Entsprechend können in einem gegebenen Universum nicht sowohl die Abweichungen von der Homogenität als auch die Änderungsraten dieser Abweichungen – aus denen sich die Abweichungen zu einem etwas späteren Zeitpunkt ergeben – exakt null sein. Ob ein annähernd homogenes Quantenuniversum trotzdem näherungsweise homogen bleibt, ist ungewiss.

Dass Vorsicht geboten ist, wiesen Thomas Thiemann und sein damaliger Doktorand Johannes Brunnemann in einer vor zwei Jahren veröffentlichten Arbeit nach. Ihr Modell beruht zwar ebenfalls auf einer vereinfachten Version der Quantenzustände eines Schleifen-Universums, lässt jedoch nicht nur homogen-isotrope Universen zu, sondern auch solche mit realistischen Dichteschwankungen. Die Vorhersagen unterscheiden sich in einiger Hinsicht deutlich von Bojowalds Modell, denn unter den inhomogenen Universen gibt es auch solche, in denen die Dichte beim Urknall unendlich groß wird. Diese bleiben jedoch in gewisser Weise »unter sich« und entwickeln sich nicht zu ausgedehnten Universen wie dem unseren. Zumindest für ausgedehnte Universen scheint die Schleifen-Quantengravitation das Problem der Singularitäten tatsächlich zu beheben.

Neben den grundlegenden Symmetrieannahmen ist Bojowalds Modell noch in anderer, weniger anschaulicher Sicht vereinfacht – grob gesprochen verwendet es einen vereinfachten Dialekt der mathematischen Sprache, in der Quantentheorien formuliert sind. Im Hinblick darauf gelang es Abhay Ashtekar, Parampreet Singh und Tomasz Pawlowski (alle drei sind Bojowalds Kollegen an der Pennsylvania State University) Anfang 2006, die Schleifen-Quantenkosmologie auf eine mathematisch solidere Grundlage zu stellen. Sie wiesen nach, ▷



Projektion der mit dem Satelliten WMAP (Wilkinson Microwave Anisiotropy Probe) gemessenen Temperaturfluktuationen auf eine Kugel. In den roten und blauen Bereichen liegt die Temperatur über beziehungsweise unter dem Mittelwert von 2,73 Kelvin. Das mit WMAP gemessene Leistungsspektrum der Temperaturfluktuationen zeigt an, wie stark Fluktuationen mit einer bestimmten Winkelgröße zum Gesamtbild des Fluktuationsmusters beitragen. Die Punkte stellen die Messwerte dar, die rote Kurve ist die Anpassung des kosmologischen Standardmodells, die am besten den Messdaten entspricht. Der graue Bereich beschreibt die Variation, die großräumige kosmische Strukturen hervorrufen. Der Pfeil zeigt an, auf welcher Winkelskala die im Text erwähnten Variationen des thermischen Spektrums liegen sollten, die Stefan Hofmann und Oliver Winkler auf Grund der Theorie der Schleifen-Quantengravitation erwarten.

Die Welt vor der Welt

E L'UNIVERSO FA BUM – BUM – BUM (»Und das Universum macht bumm – bumm – bumm«). Ob der italienische Liedermacher Paolo Conte beim Schreiben seines Lieds »Architetture lontane« (Ferne Architekturen) an das Bild eines zyklischen Kosmos dachte, der aus seinen eigenen Trümmern neu entsteht, ist ungewiss. Fest steht jedoch, dass Menschen in zahlreichen Kulturen darüber rätselten, ob es vor unserer Welt eine andere gab.

Es überrascht nicht, diese Vorstellung bei agnostischen Philosophen zu finden, denn deren Kosmologie muss auf einen Schöpfergott verzichten. In »Der Wille zur Macht«, nach seinem Tod erstmals 1901 veröffentlicht, schreibt Friedrich Nietzsche, es habe die Welt schon immer gegeben und sie werde für immer existieren. Das Universum sei eine in zahlreichen Zentren konzentrierte Energie und füge sich in einer unendlichen Folge von Zyklen neu zusammen. Für einen Gott gebe es darin keinen Platz.

Der Schriftsteller Edgar Allen Poe war anderer Meinung. In der Society Library, einer kleinen New Yorker Bibliothek, sprach er 1848 darüber, wie der Kosmos im Gleichklang mit dem Herzen Gottes periodisch zusammenschrumpfe und dann erneut expandiere. Nur wenige Zeitgenossen wollten das akzeptieren, doch Poe konnte einen alltäglichen »Beweis« für seine Kosmologie angeben: die Dunkelheit der Nacht. In einer (gegenwärtigen) Welt von endlichem Alter könne das Licht der Sterne mit seiner endlichen Geschwindigkeit nicht das Weltall füllen, und deswegen sei dieses finster. Damit kam er der modernen Erklärung näher als berühmte Gelehrte wie Johannes Kepler und Edmond Halley.

Im Hinduismus wurde ein zyklischer Kosmos mit dem Lebensrhythmus des Schöpfergottes Brahma in Bezug gesetzt. In der Kosmologie der Puranas, einer Sammlung von Mythen über das Wirken der Götter, durchläuft die Welt in 4,32 Millionen Jahren vier Zeitalter, in denen die Moral der Menschen kontinuierlich verfällt. Erst mit dem Beginn des jeweils nächsten Zyklus stellt eine Inkarnation des Gottes Vishnu die moralische Ordnung wieder her. Eintausend dieser Zyklen bilden im Leben Brahmas einen Tag, an dessen Ende das Universum durch Fluten oder Feuer zerstört wird. Darauf folgt eine ebenso lange Nacht, an die sich der nächste Tag im Leben dieses Gottes anschließt. Ein endloser Prozess, der auf dem unergründlichen Wirken Brahmas beruht.

Das ist nur eines von vielen Beispielen einer zyklischen, sich fortwährend wiederholenden Zeit. Als die englischen Kolonialherren im 18. Jahrhundert auf dem indischen Subkontinent diese Vorstellung kennen lernten, schlossen sie daraus, die Inder seien im mythisch-religiösen Denken sowie in archaischen Herrschaftsstrukturen gefangen. Sie bedürften der kolonialen »Fürsorge« durch Europäer, deren lineares Zeitmodell – erkennbar an der stetig fortschreitenden Jahreszählung – für ihre kulturelle, wirtschaftliche und soziale Überlegenheit spräche. Dagegen weist die Historikerin Romila Thapar überzeugend nach, dass bereits im indischen Altertum lineare und zyklische Zeitvorstellungen nebeneinander existierten.

Obwohl der Gott Schiwa in der »Dreieinigkeit der Hindus« neben dem Weltschöpfer Brahma und dem Bewahrer

▷ dass man die abstrakte Zeitkoordinate des vereinfachten Modells durch eine »physikalische Zeit« ersetzen kann, die nicht abstrakt-mathematisch, sondern mit Bezug auf konkrete »physikalische Uhren« definiert ist – ein wichtiger Schritt hin zu einem Modell, dessen Konzepte allesamt prinzipiell der Beobachtung zugänglich sind. Zusätzlich konnten sie zeigen, dass kollabierende Universen, deren Geometrie sich zunächst näherungsweise im Rahmen der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben lässt, nach einer nur in der Sprache der Quantengeometrie beschreibbaren Phase in expandierende Universen mit wiederum klassischer Geometrie übergehen.

Bei allen theoretischen Fortschritten ist unbestreitbar, dass in der Wissenschaft Beobachtungen und Messungen das letzte Wort haben müssen. Das freilich führt bezüglich der Theorien und Modelle der Quantengravitation zu großen Problemen, denn im Allgemeinen ist zu erwarten, dass deren charakteristische Effekte erst bei experimentell unerreichbar hohen Energien und kurzen Entfernungen wichtig werden. Selbst wenn man einen herkömmlichen Teilchenbeschleuniger mit der Größe des Sonnensystems bauen könnte, gelänge es nicht, die erforderlichen Energien zu erzeugen. Der einzige Ausweg ist, das Universum selbst als Labor zu betrachten und Vorhersagen der Schleifen-Quantengravitation mit kosmologischen Beobachtungen zu konfrontieren.

Die Hoffnung, dass dies bereits in den nächsten Jahren gelingt, weckt eine neue Arbeit von Stefan Hofmann vom Perimeter-Institut in Waterloo (Kanada) und Oliver Winkler von der Universität von New Brunswick in Fredericton (Kanada). Ihren Berechnungen zufolge könnten Quantengravitations-Effekte der kosmischen Hintergrundstrahlung Eigenschaften aufprägen, die von den Vorhersagen der klassischen Kosmologie merklich abweichen.

Die Hintergrundstrahlung ist eine thermische Strahlung, sodass deren spektrale Eigenschaften nur von einem einzigen Parameter abhängen, der Strahlungstemperatur. Allerdings variiert der Wert der Strahlungstemperatur bei der Hintergrundstrahlung um einige tausendstel Prozent, je nachdem, auf welchen Ort am Nachthimmel man sein Teleskop ausrichtet. Für Orte, die am Himmel 90 Grad auseinanderliegen, könnten Quantengravitations-Effekte bewirken, dass die spektrale Energieverteilung um bis zu 10 Prozent von den Vorhersagen der herkömmlichen Modelle abweicht.

Die bisher existierenden Daten sind zu ungenau, um solche Abweichungen nachzuweisen (siehe Bild links), doch bereits weitere Messungen des Nasa-Satelliten WMAP, der seit 2001 die Strahlung vermisst, sowie des europäischen Satelliten Planck, der im kommenden Jahr gestartet werden soll, könnten das schon bald ändern. ◁

AKG BERLIN

Shiva Nataraja, der tanzende Schiwa, in einem Pfeilerrelief aus dem 10. Jahrhundert im Nataraja-Tempel von Chidambaram (Tamil Nadu, Südindien). Der Tanz Schiwas steht für die grenzenlose Energie dieses Gottes, die Welt zu erschaffen, zu erhalten und zu zerstören. Die Reliefs in Chidambaram gehören zu den ältesten Darstellungen des Motivs.

Vishnu als Zerstörer des Kosmos gilt, sprechen ihm seine Anhänger diese drei Eigenschaften allein zu. Kaum ein anderer Hindu-Gott scheint so ambivalent und paradox zu sein wie Schiwa, der auf dem Haupt Apasmaras, eines die Menschen bedrohenden Dämons, den Tanz der Glückseligkeit tanzt. Auch das Würfelspiel Schiwas mit seiner Gattin Parvati (das er gewöhnlich verliert) thematisiert die zugleich schöpferische und zerstörerische Kraft dieses Gottes.

Sich als Hindu die Frage nach dem Sinn des Wirkens Brahmas oder Schiwas zu stellen, ist genauso vergeblich, wie sich als Christ zu fragen, was Gott tat, bevor er die Welt erschuf. In seinen Bekenntnissen zitiert der Kirchenvater Augustinus den Scherz, Gott habe zuvor die Hölle geschaffen, um diejenigen, die das wissen wollten, darin unterzubringen. Augustinus selbst war dagegen ratlos und antwortete: »Was ich nicht weiß, das weiß ich nicht.«

Götz Hoeppe

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Thomas Thiemann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam, Mitglied des Perimeter-Instituts für theoretische Physik in Waterloo (Kanada) und Gastprofessor an der Beijing Normal University. Zur Schleifen-Quantengravitation leistete er wesentliche Beiträge. Am selben Institut arbeitet auch **Markus Pössel**, dessen Forschungsinteresse nach einer Doktorarbeit im Bereich der Quantengravitation vor allem den Grundlagen und der Vermittlung der relativistischen Physik gilt.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Quantum nature of the big bang: an analytical and numerical investigation. Part I. Von A. Ashtekar, T. Pawlowski und P. Singh in: Physical Review, D73, 124038, 2006

Loop quantum cosmology. Von Martin Bojowald in: Living Reviews in Relativity, Bd. 8, Nr. 11, 2005

Lecture notes on loop quantum gravity. Von Thomas Thiemann in: Lecture Notes in Physics, Bd. 631, S. 41, 2003

Three roads to quantum gravity. Von Lee Smolin. Perseus Book Group, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872680.

BILDSTABILISIERUNG

Freiheit in der Dämmerung

Längere Belichtungszeiten müssen Fotografen nicht mehr erschrecken.

Von Mark Fischetti

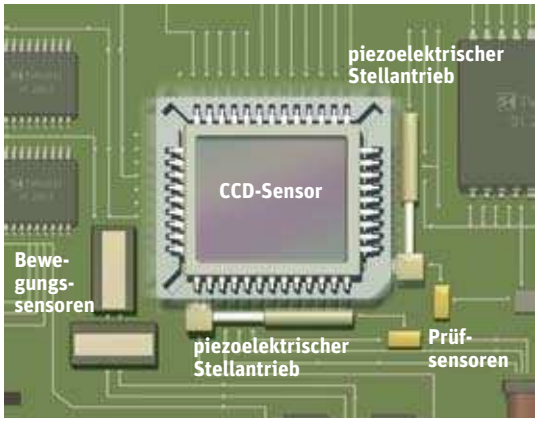
Da steht er nun, der Gamsbock, und äugt wachsam zum Wanderer herüber. Welch ein Fotomotiv! Das Zoom holt es bei einer Brennweite von etwa zweihundert Millimetern ganz dicht heran. Doch wie lautete noch die Faustregel? Ohne Stativ entspricht die längste mögliche Belichtungszeit dem Reziprokwert der Brennweite. In diesem Fall liegt die Freihandgrenze also bei 1/200 Sekunde. Vor dem dunklen Felshintergrund benötigt das Tier allerdings bei der erwünschten Blende 1/30 Sekunde. Noch vor einigen Jahren hätte das Zittern der Hand eine solche Aufnahme verwackelt. Inzwischen aber sind Systeme für Fotografen und Videofilmer auf dem Markt, die diese Bewegungen kompensieren und die Freihandgrenze um bis zu drei Blendstufen verschieben, im Beispiel auf 1/250 Sekunde.

Die Hersteller sprechen von Anti-Shake- oder Shake-Reduction-Systemen, von Image Stabilizern oder vom Super Steady Shot. Das Ziel ist stets, die infolge einer Kippbewegung auf dem Film oder dem CCD-Chip verschobene Abbildung wieder zurechtzurücken. Dazu korrigieren bewegliche Prismen oder Linsen im Objektiv dessen Strahlengang oder der Chip wird verschoben (siehe Grafiken). Die »optische« Variante ist seit mehr als zehn Jahren auf dem Markt, erfordert aber hochwertige optische Bauelemente und dementsprechend teure Spezialobjektive. Das zweite Verfahren ist mechanisch einfacher zu realisieren und verlegt die Korrektur in die Kamera. Das spart Kosten, hat aber auch einige Nachteile: Der Autofokus stellt nicht auf ein bereits stabilisiertes Motiv scharf. Zudem wiegt der Chip mehr als eine Korrekturlinse, erfordert deshalb größere Stellantriebe und der Stromverbrauch steigt. Beide Verfahren benötigen Drehratensensoren, um die Kippbewegung zu detektieren und zu messen.

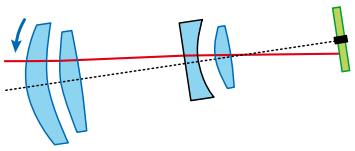
Auch für die Korrektur in Videokameras eignet sich die rein optische Bildstabilisierung, dort verändert ein beweglicher Balg im Linsensystem den Strahlengang. Alternativ dazu wird aber nicht der Chip, sondern die verwendete lichtempfindliche Fläche darauf nachgeführt. Da fünfzig Bilder pro Sekunde ausgelesen werden, lässt sich eine Kippbewegung ohne zusätzliche Sensoren anhand von Verschiebung des abgebildeten Objekts im Randbereich der belichteten Chipfläche berechnen. Diese rein elektronische Variante erfordert zwar keinerlei mechanische Verstellung, reduziert aber den Aufnahmewinkel der Kamera um zehn bis zwanzig Prozent. Für Fotokameras eignete sich dieses Verfahren ohne zusätzliche Sensoren für die Kippbewegung nur bedingt, da sie mit nur einer Aufnahme auskommen müssen. Vorsicht vor Mogelpackungen: Als »digitale Bildstabilisierung« oder auch »ISO-Verwacklungsschutz« firmiert auch ein Hochsetzen der Empfindlichkeit. Das erlaubt zwar kürzere Belichtungszeiten, erhöht aber leider auch das Bildrauschen.

Mark Fischetti ist Redakteur von »Scientific American«. Die Redaktion dankt den Firmen Panasonic und Sony für Informationen.

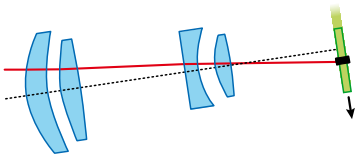
Eine Digitalkamera kann Verwackeln ausgleichen, indem sie den CCD-Sensor-Chip der Veränderung des Strahlengangs nachführt. Prüfsensoren kontrollieren das Ergebnis.



Wenn die Kamera absinkt …



… bewegt sich der CCD-Sensor nach unten.



GEORGE RETSECK, NACH: EASTMAN KODAK AND CANON USA

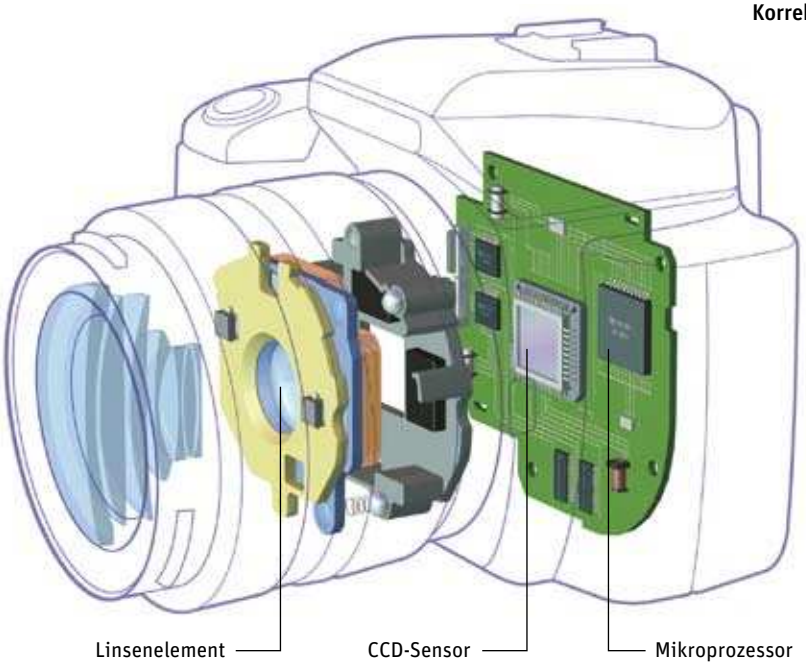
Wussten Sie schon?

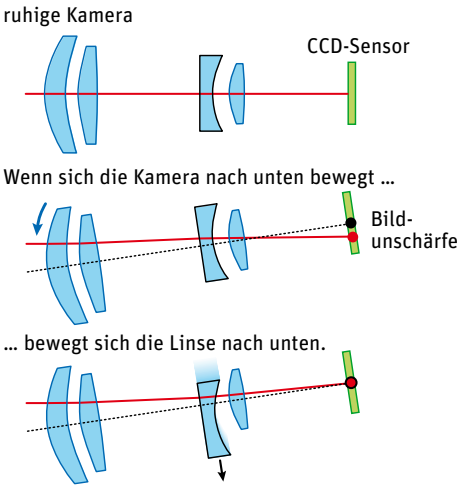
▶ **Der Wischeffekt** liefert immer wieder beeindruckende Fotos bewegter Motive. Dazu muss die Kamera während der Aufnahme mit dem Objekt – einem fahrenden Auto, einem laufenden Tier – mitgezogen werden. Ein Bildstabilisierungssystem würde dies aber zu kompensieren suchen, der Fotograf sollte es deshalb ausschalten. Es gibt bereits Software, die unbeabsichtigtes Wackeln von Nachziehen unterscheiden kann, dazu benötigt sie allerdings einige Sekundenbruchteile.

▶ **Fotohandys** müssen ohne mechanische Systeme zur Bildstabilisierung auskommen. Erstens wäre der Einbauraum dafür zu klein, zweitens würden diese keinen der üblichen Falltests bestehen, mit denen die Belastbarkeit von Handys geprüft wird.

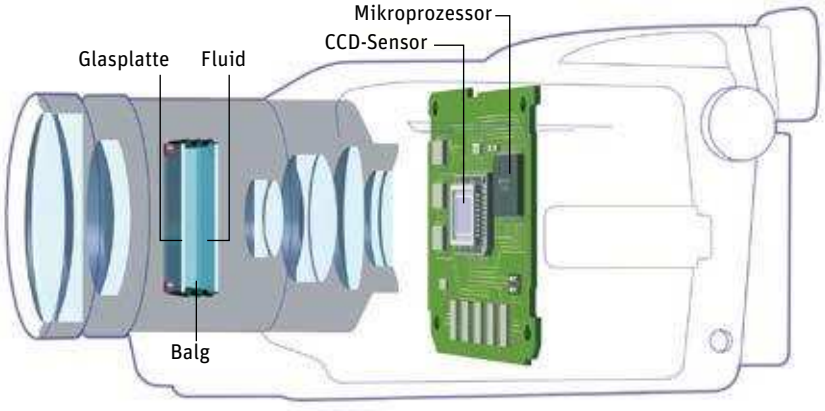
▶ **Auch hochwertige Ferngläser** sind mit Korrektursystemen ausgestattet, da bei hoher Vergrößerung das geringste Handwackeln verstärkt wird. Die Firma Canon setzt dazu beispielsweise in jedes Objektiv einen Korrekturbalg ein wie in Videokameras.

Linsen bewegen sich auf Kugellagern im Objektivgehäuse, über Magnete und Spulen oder durch piezoelektrische Aktuatoren ausgelenkt. Sensoren bestimmen Richtung und Geschwindigkeit der Kamera, ein Prozessor steuert die Verstellelemente. Kippt die Kamera beispielsweise nach unten ab, würde die optische Achse auf dem CCD-Chip oder dem Film nach oben wandern. Indem eine Korrekturlinse noch tiefer sinkt, lenkt sie aber das Licht zurück.

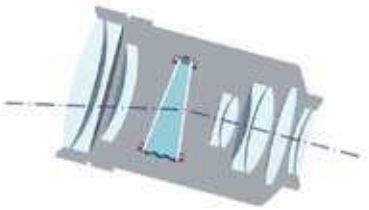




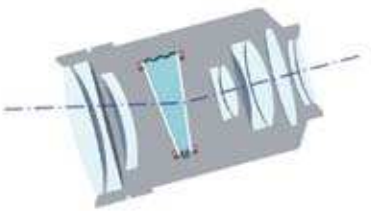
In einem digitalen Camcorder gleicht ein variables Winkelprisma oder ein lichtbrechender Balg Erschütterungen aus. Eine alternative Methode ohne optische Elemente ist die elektronische Bildstabilisierung (hier nicht dargestellt).



Wenn die Kamera nach oben kippt,
dehnt sich der Balg am unteren Ende aus.



Wenn die Kamera nach unten kippt,
dehnt sich der Faltenbalg am oberen Ende aus.



Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Pack den Bio in den Tank

Ethanol und Biodiesel haben Konjunktur. Doch eine echte Alternative zu petrochemischen Kraftstoffen bieten erst Biodiesel einer neuen Generation.

Von Gerhard Samulat

Wann Erdöl zur Neige geht, ist umstritten; nicht jedoch die Tatsache, dass dies in absehbarer Zeit geschieht. Schon vorher aber wird sich die Preisspirale kräftig drehen: »Wenn der Vorstand einer Mineralölgesellschaft heute meint, in hundert Jahren gäbe es noch Öl, so stimmt das. Doch von billig kann dann keine Rede mehr sein«, erklärt Bodo Wolf, Firmengründer von Choren Industries. Das in Freiberg bei Dresden ansässige Unternehmen setzt deshalb auf das gigantische Potenzial organischer Materie, die mittels Fotosynthese die Energie der Sonne speichert. Kurz: auf Biomasse.

Auch wenn die Erdölressourcen noch lange reichen sollten, dürfte sich ihre Ausbeutung immer aufwändiger und damit teurer gestalten, und das bei steigender Nachfrage. Vom billigen Öl können wir wohl nur noch nostalgisch träumen, denn seit Beginn der 1980er Jahre wird weltweit mehr davon verbraucht, als die Geologen neu entdecken. Und die Schere geht immer schneller auseinander. Ob die Ressourcen bereits nach dreißig Jahren erschöpft sind, wie Pessimisten befürchten, oder erst in fünfzig, bedeutet lediglich, dass entweder bereits unsere Kinder auf dem Trockenen sitzen werden oder erst unsere Enkel. Zumindest vermuten die Anhänger der so genannten Peak-Oil-Theorie, dass spätestens in zehn oder zwanzig Jahren die Erdölförderung abnimmt, weil konventionell auszubeutende Quellen dann bereits langsam versiegen. In den 1990er Jahren kostete das »Schwarze Gold« noch weit unter zwanzig Dollar pro Barrel (das entspricht ungefähr 159 Litern). Heute frohlocken Ökonomen schon dann, wenn sich der Preis um die 55 Dollar einpendelt. Allerdings: Ob dieser Preisanstieg bereits durch Verknappung und steigende Förderkosten bedingt ist, vermag niemand mit Sicherheit zu beantworten. Zumal Öl schon immer ein Spielball von Politik und Wirtschaft war.

Unstrittig ist aber, dass Alternativen entwickelt werden müssen. Doch trotz aller Sorgen – im Vergleich zu anderen Energieträgern ist Erdöl immer noch konkurrenzlos preiswert. Das Gespann aus Wasserstoff und Brennstoffzellen ist zwar ein hoch gehandelter Favorit, doch das Gas muss energieaufwändig gewonnen werden. Die Kapazität von Solar- beziehungsweise Windkraftanlagen oder Kernreaktoren reicht derzeit noch nicht aus, um den Bedarf zu decken. Und die Kernfusion wird – wenn denn alles so funktioniert, wie sich die Wissenschaftler und Ingenieure das vorstellen – nicht vor 2030 verfügbar sein (siehe auch Spektrum Spezial 1/2007). Zudem liefern alle diese Technologien erst einmal elektrischen Strom. Um den zum Antrieb von Fahrzeugen zu nutzen, wären leichte und kompakte Batterien vonnöten, die nach kurzem Aufladen an der Steckdose ein Auto weiter als 150 bis 200 Kilometer bringen können.

Wissenschaftler wie der Prozessverfahrensingenieur Bodo Wolf glauben daher, dass einzig und allein die Umwandlung von Biomasse zu Kraftstoffen einen Ausweg weist. Letztlich entstand auch Erdöl aus solchem Material, das allerdings einige hundert Millionen Jahre tief in der Erdkruste allerlei chemische Umwandlungen erfuhr. Kein Wunder also, dass biogene Treibstoffe die petrochemischen ohne große Probleme ersetzen können und die schon existierende Infrastruktur genutzt werden kann.

Sprung von zwei auf zehn Prozent

Derzeit setzen die Firmen, die ähnlich schnell aus dem Boden schießen wie das Kraut, das sie verwerten, meist auf Herstellungsverfahren der »ersten Generation«: Sie vergären zucker- oder stärkehaltige Samen oder Feldfrüchte wie Zuckerrüben, Zuckerrohr, Mais, Roggen oder Weizen zum Benzinersatz Ethanol oder sie veredeln das Öl von Pflanzen wie Raps, Soja oder Palmen zu Biodiesel.

Dabei erhalten die Unternehmen politische Unterstützung. So sollen nach den Regierungsvorgaben in Deutschland nunmehr gut vier Prozent des an den Tankstellen ausgegebenen Dieselkraftstoffs aus regenerativen, organischen Quellen stammen. Für Benzin liegt die Quote in den nächsten Jahren bei durchschnittlich zwei Prozent. Den herkömmlichen Treibstoffen aus fossilen Quellen sind daher künftig Biodiesel oder Bioethanol beizumischen. Im Gegenzug entfallen Steuerbegünstigungen, was die Autofahrer An- ▷

Billiges Erdöl dürfte bald nur noch eine schöne Erinnerung sein. Doch gehört die Zukunft wirklich Raps und Co.?

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

▷ fang des Jahres umgehend in Form höherer Spritpreise zu spüren bekamen.

Der Europäischen Union ist das noch zu wenig. Europaweit sollen bis zum Jahr 2010 5,75 Prozent Biokraftstoffe beigemischt werden, die EU-Kommission fordert, diesen Anteil bis 2020 sogar auf mindestens zehn Prozent zu steigern. Und auch der amerikanische Präsident George W. Bush kündigte kürzlich in einer Rede zur Lage der Nation an, dass der Anteil an Biokraftstoffen bis zum Jahr 2017 auf zwölf bis dreizehn Prozent steigen soll.

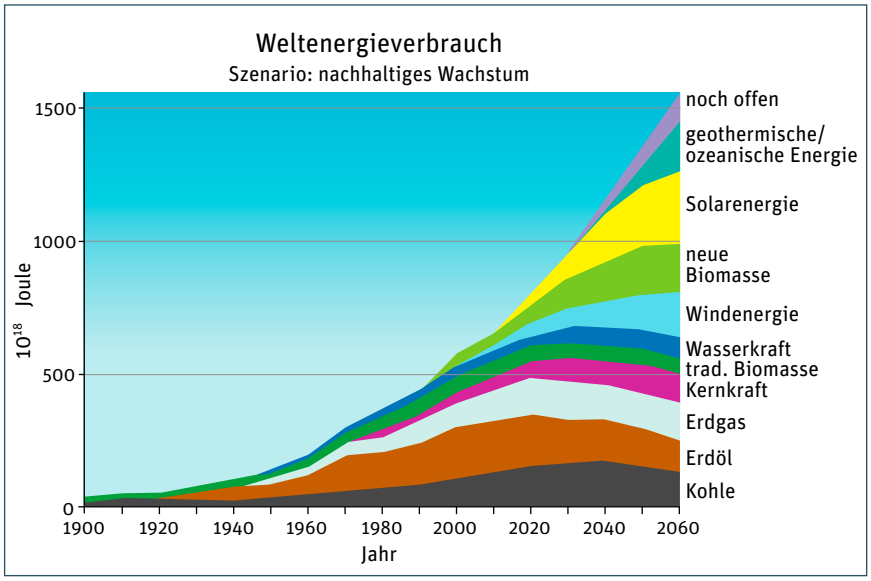
Dabei liegt in den USA das Hauptaugenmerk auf Ethanol. Das gilt auch für Brasilien. Dort macht die Zumischung zum Normalbenzin bereits ein Viertel aus und wird meist aus heimischem Zuckerrohr gewonnen. In Europa hingegen findet Biodiesel, vorzugsweise aus Raps hergestellt, immer größere Verbreitung. Deutschland ist mit Abstand größter Produzent. Im Jahr 2006 wurden hier schätzungsweise knapp drei Milliarden Liter produziert. Das entspricht allerdings nur gut fünf Prozent des einheimischen Verbrauchs an Kraftstoffen von gut fünfzig Millionen Tonnen pro Jahr.

Ökologisch bedenklicher Bioboom

Das Engagement der Politik beruht nicht allein auf der Notwendigkeit, eine neue, preiswerte Kraftstoffressource zu erschließen. Der Ersatz von petrochemischen Produkten ist auch Teil der Strategie gegen den Treibhauseffekt. Schließlich wird bei der Verbrennung organischer Stoffe nur das Kohlendioxid freigesetzt, das die Pflanze bei ihrem Wachstum aufgenommen hat. Nach Ansicht ihrer Befürworter ist Biodiesel daher klimaneutral, wenngleich in einer realistischen Umweltbilanz sicherlich auch der Aufwand für Anbau, Transport und Verarbeitung hinzugerechnet werden muss, inklusive Fertigung und Transport von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln.

Der Energieexperte Alexander Farrell von der Universität von Kalifornien in Berkeley schätzt die CO_2-Einsparung maximal auf etwa 13 Prozent oder rund ein halbes Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Liter (zum Vergleich: Je Liter Diesel fallen knapp 3,8 Kilogramm CO_2-Äquivalente an, beim Benzin ist es etwas weniger). Eine Bilanz des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg ifeu fällt allerdings deutlich besser aus. Durch den Anbau von Raps zur Herstellung von Biodiesel ließen sich pro Liter 2,2 Kilogramm CO_2-Äquivalente einsparen. »Das Ergebnis hängt aber davon ab, wie die Nebenprodukte Rapsschrot und Glyzerin genutzt werden«, sagt Sven Gärtner, einer der Autoren der Heidelberger Studie. Während der Mahlrückstand der Rapsverarbeitung normalerweise bereits in der Futtermittelindustrie eingesetzt wird, fehlt derzeit noch ein Konzept für das bei der Biodieselherstellung in relativ großen Mengen anfallende Glyzerin, immerhin einhundert Kilogramm pro Tonne Diesel.

Was sich schon recht »nachhaltig« anhört, hat jedoch eine ökologisch bedenkliche Kehrseite: In Ländern wie Brasilien, Indonesien oder Malaysia müssen Regenwälder riesigen Monokulturen weichen, auf denen schnell wachsende Energiepflanzen für den Export angebaut werden. Denn deren Vorkommen in den Industrieländern deckt nicht den Bedarf. So wäre ein Vielfaches der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands nötig, wollte man den gesamten heimischen Jahresverbrauch an Treibstoffen durch Biodiesel ersetzen. Nach Angaben der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen (Ufop) gedeiht mittlerweile auf einem Zehntel der deutschen Äcker Raps – und doch deckt die Ernte keine fünf Prozent des Dieselbedarfs. Umweltorganisationen wie Greenpeace, der World Wide Fund For Nature WWF, BirdLife International und das European Environmental Bureau warnen daher bereits vor einem Raubbau an der Natur. Weil die Energiedichte von Biomaterial – sei es Getreide, Gemüse oder gar Biomüll – generell nicht sehr



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM, NACH: CHOREN INDUSTRIES

Sofern Politik und Wirtschaft auf ein nachhaltiges Wachstum setzen, könnten erneuerbare Energiequellen in etwa vierzig Jahren den Bedarf der Weltbevölkerung mehr als zur Hälfte decken.

In Kürze

- Die **Erdölressourcen** sind begrenzt und petrochemische Kraftstoffe werden deshalb zwangsläufig immer teurer.
- Biodiesel oder Ethanol aus **Feldfrüchten** können den weltweiten Treibstoffbedarf jedoch nicht einmal annähernd decken. Der großflächige Anbau von Energiepflanzen birgt zudem Risiken für die Umwelt.
- **Biokraftstoffe der zweiten oder dritten Generation** hingegen entstehen aus beliebigen organischen Materialien. Die Herstellungsverfahren arbeiten deshalb wesentlich effizienter und umweltschonender.

hoch ist, könnte ein Import zudem mehr Sprit verschlingen, als die Verwertung liefert. Kein Wunder also, wenn Forscher wie der Ökologe David Pimentel von der amerikanischen Cornell-Universität vielen Biomasse-Verwertungsstrategien eine negative Energiebilanz vorwerfen.

Als ein Ausweg aus dieser Misere plant das Forschungszentrum Karlsruhe in seinem Projekt Bioliq daher, das biogene Material zunächst einmal in dezentralen Einrichtungen in ein energiereicheres Zwischenprodukt umzuwandeln. Die kurzen Wege zu den Bauern würden Treibstoff sparen helfen. Erst dann erfolgt die chemische Weiterverarbeitung in Raffinerien.

55 Cent pro Liter

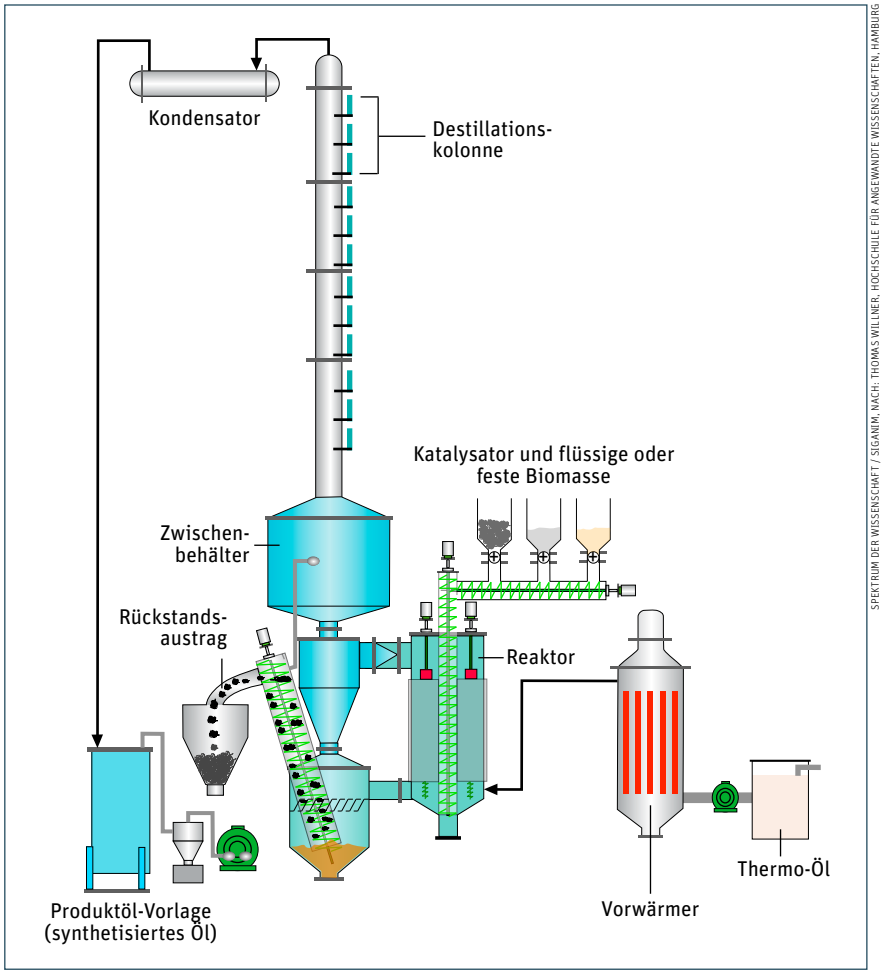
Bodo Wolf von Choren Industries sowie weitere Biokraftstoff-Entwickler wie Christian Koch von der Alphakat Gesellschaft für Katalytische Aufbereitungs-Technologien in Buttenheim, Thomas Willner von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg oder Ernst A. Stadelbauer von der Fachhochschule Gießen-Friedberg gehen einen Schritt weiter. Die von ihnen entwickelten Verfahren der zweiten und dritten Generation sollen auch organischen Abfall sowie ganze Pflanzen – also auch Stiel und Stängel – verwerten und so drei- bis viermal effizienter Kraftstoffe aus der gleichen Menge an Biomasse gewinnen.

Ihre Produkte tragen die Markennamen »Biomass to Liquid« (BtL), »erneuerbare synthetische Kraftstoffe« (Choren Industries), »Sunfuel« (Volkswagen) oder Sundiesel (DaimlerChrysler). Zwei Herstellungsverfahren scheinen besonders geeignet: Das Carbon-V-Verfahren der Choren Industries GmbH sowie eine Methode der direkten Verflüssigung von Biomasse mittels Katalysatoren – ein Verfahren, das der im Jahr 2002 verstorbene Ernst Bayer an der Universität Tübingen in den 1980er Jahren im Rahmen eines Preisausschreibens des Öl-Multis BP entwickelt hat.

Das Carbon-V-Verfahren nutzt die so genannte Fischer-Tropsch-Synthese. Die deutschen Chemiker Franz Fischer (1877–1947) und Hans Tropsch (1889–1935) ersannen sie 1925, um aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff lange Kohlenwasserstoffketten zu bilden. Während des Zweiten Weltkriegs wurde das Verfahren großtechnisch zur Kohleverflüssigung eingesetzt. Damit wollte sich das Dritte Reich unabhängig von Treibstoffimporten machen. Als das Erdöl nach dem Krieg dann auch in Deutschland wieder billig zu haben war, geriet das Fischer-Tropsch-Verfahren in Vergessenheit, zumal es vergleichsweise kostspielig ist. »Mit unseren Anlagen können wir den Kraftstoff für 55 Cent pro Liter herstellen«, meint Wolf. Das ist zwar noch fast doppelt so teuer wie Diesel aus Erdöl. »Aber unsere Kosten sind auch in Zukunft kalkulierbar.«

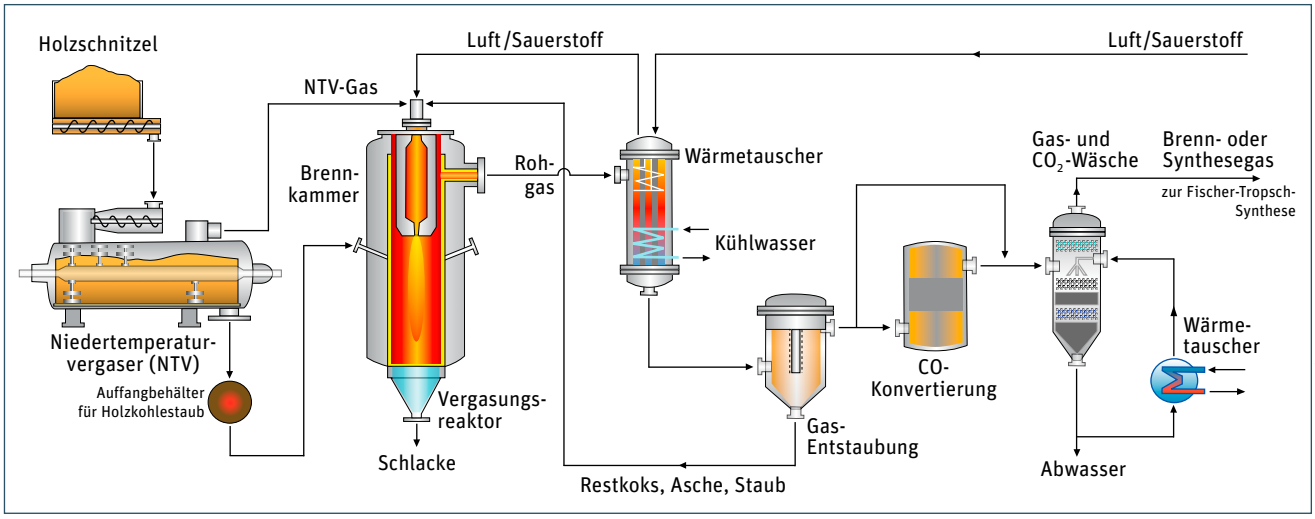
Ein Vorteil der Methode ist, dass sich jegliche Art von organischem Material dafür eignet, selbst Holz, altes Fett, Altöl, Klärschlamm und sogar Kunststoffabfälle. Nach einer Studie der Deutschen Energie-Agentur dena, an der sich überdies so namhafte Firmen wie Daimler-Chrysler, Volkswagen, BASF, die Deutsche BP, Total sowie der Anlagenbauer und Verfahrenstechniker Lurgi beteiligten, ließen sich hier zu Lande bereits gut zwanzig Prozent des heutigen Kraftstoffbedarfs auf diese Weise decken. Das ist viermal mehr, als die Biotreibstoffe der ersten Generation zu leisten vermögen. Bis zum Jahr 2030 könnte es sogar mehr als ein Drittel des bis dahin prognostizierten Verbrauchs sein.

Die Verwertung von Rest- und Abfallstoffen könnte zudem die Befürchtung entschärfen, Lebensmittel müssten zwangsläufig knapper und teurer werden, weil sich Bauern zunehmend dem lukrativeren Anbau von Energiepflanzen zuwenden. Schon jetzt steigen die Weltmarktpreise für Weizen, Mais und Soja, da Anbauflächen fehlen. Bodo Wolf sieht das Ganze aber pragmatisch: »Derzeit buttert die Europäische Union jährlich ▷



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANM, NACH: THOMAS WILLNER, HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN, HAMBURG

Beim katalytischen Kracken werden die Rohstoffe (Edukte) in einem Reaktor mit dem Katalysator und einem Öl versetzt. Das sumpfartige Gemisch lässt sich verhältnismäßig einfach erwärmen, was den Prozess beschleunigt. Der kohlenwasserstoffhaltige Dampf aus dem Reaktor gelangt über einen Zwischenbehälter in die Destillationskolonne. Im anschließenden Kondensator entsteht schließlich das gewünschte Produktöl.



Bevor aus Holz ein Synthesegas für das Fischer-Tropsch-Verfahren wird, durchläuft es eine komplexe Prozesskette. Es wird zerkleinert und in einen Niedertemperaturvergaser zu einem kohlenwasserstoffhaltigen Gas verschwelt. Zusammen mit Sauerstoff und Koks sowie Asche und Staub wird daraus bei Temperaturen von weit über eintausend Grad Celsius ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, dann ein Rohgas aus niedermolekularen Bausteinen. Nach einigen Prozessschritten verketten Katalysatoren diese in der Fischer-Tropsch-Synthese zum gewünschten Kraftstoff.

▷ Milliarden Euro an Subventionen in die Landwirtschaft. Der Anbau von Energiepflanzen ist ein Weg in deren Wirtschaftlichkeit.«

Statt auf Feldfrüchte setzt sein Unternehmen aber zunächst auf Holz. Das wird zerkleinert und in einen Kessel gefüllt. Das für die Fischer-Tropsch-Synthese notwendige Synthesegas aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff entsteht bei 1200 bis 1700 Grad Celsius in einem Reaktor, in den kohlenwasserstoffhaltiges Schwelgas und Biokoks aus einem Niedertemperaturvergaser eingeblasen wird. Bei so hohen Temperaturen zerfallen die organischen Moleküle. Gleiches geschieht mit Schadstoffen wie Teeren, Phenolen, Naphthalinen. Die niedermolekularen Bausteine werden dann bei niedrigeren Temperaturen mit Hilfe von Kobalt-Katalysatoren zum gewünschten Kraftstoff synthetisiert. Noch in diesem Jahr will Choren mit der Massenproduktion starten und bald in mehreren Anlagen, verteilt über ganz Deutschland, bis zu eine Million Tonnen Biokraftstoff pro Jahr herstellen. Allerdings zunächst exklusiv für Shell, das knapp ein Viertel der Gesellschafteranteile besitzt und damit die Entwicklung zu einem erheblichen Teil finanzierte.

Um Biodiesel heute schon konkurrenzfähig zu machen, drehen Christian Koch von der bayerischen Firma Alphakat sowie Thomas Willner von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg weiter an der Kostenschraube. Mit einem neuartigen Verfahren der direkten Verflüssigung biologischen Ausgangsmaterials wollen sie den Liter Biokraftstoff zu Preisen um die dreißig Cent anbieten, also noch unter dem heutigen Marktpreis für Diesel aus Erdöl.

Dazu setzen sie auf katalytische Reaktionsbeschleuniger – auf puderartige Aluminosilikate, die Koch selbst entwickelt hat. Sie spalten die langkettigen Kohlenwasserstoffketten in Minutenschnelle und bei weniger als 400 Grad Celsius ohne Umweg über den Fischer-Tropsch-Prozess auf. »Mit der direkten Verflüssigung erreichen wir energetische Wirkungsgrade von rund siebzig Prozent«, rechnet Willner vor. Analysen beweisen, dass in der Ölfraktion unverzweigte Kohlenwasserstoffketten dominieren, ein Merkmal guter Kraftstoffe. Bemerkenswert ist ferner, dass die Katalysatoren eventuell vorhandene Gifte wie Schwermetalle oder Chlor binden.

Über mangelndes internationales Interesse kann sich Koch nicht beklagen. In seinem Büro geht es hektisch zu. Stets klingelt das Telefon oder surrt ein Faxgerät. »Ich verkaufe jeden Monat eine Anlage.« Er empfindet sich als Einzelkämpfer: »Die heimische Industrie setzt mit Milliardenbeträgen auf Verfahren der ersten Generation. Mit negativer Energiebilanz. Das soll sie nur machen«, meint Koch, der aus langjähriger Berufserfahrung spricht. Offenbar ist er ganz zufrieden, dass ihn die großen Konzerne in seiner Marktnische noch unbehelligt lassen.

In Mexiko arbeitet inzwischen eine Anlage im Dauerbetrieb, die zunächst Bitumen verarbeitet. Der Hamburger Wissenschaftler Willner wandelt derweil Holz, Stroh sowie Kunststoffrückstände aus der Automobilindustrie um. Zudem arbeiten er sowie die Arbeitsgruppe um Ernst Stadelbauer von der Fachhochschule Gießen-Friedberg an Verfahren, die sogar ohne Katalysatoren auskommen. Mit ausschließlich moderatem Druck von bis zu achtzig Bar und Temperaturen von einigen hundert Grad Celsius lassen sich beispielsweise Klärschlamm oder tierische Fette zumindest teilweise in Kraftstoffe umwandeln.

Willner bezeichnet seinen katalytisch gewonnenen Diesel als Biokraftstoff der dritten Generation. Würden alle Energiesparoptionen in der Motorentechnik umgesetzt und stellte sich der Verbraucher in seinem Nutzungsverhalten auf die ökologischen Erfordernisse ein, dann sei es sogar denkbar, allein mit der Direktverflüssigung künftig den Spritdurst Deutschlands zu stillen. ◁

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872685.

1957

Der Tod kommt vormittags

»Über die tages-, jahreszeit- und wetterabhängige Verteilung der Todesfälle wurde aus dem Institut für Gerichtliche Medizin und Versicherungsmedizin der Universität München berichtet …, daß sich die Todeshäufigkeiten während der Tages- und Nachtzeit ungleich verteilen. Ein Minimum ergab sich von 18 bis 24 Uhr, das Maximum liegt in der Zeit von 6 bis 12 Uhr. … Auf das Jahr bezogen ergab sich ein Sterblichkeitsgipfel im Winter und Frühjahr … Bei föhnig übersteigertem Schönwetter nehmen Todesfälle zu und erreichen ein Maximum beim Wetterumschlag.« *Orion, 12. Jg., Nr. 6, S. 496, Juni 1957*

Der neue Kindersitz vereint »Sicherheit« und Vielfalt.

Antibiotika vorbeugend gegen Rost

»Die Korrosion von Eisen wird durch Mitwirkung von Bakterien beschleunigt, daher lag der Schluß nahe, daß die Antibiotika Salvarsan und Penicillin die Eisenkorrosion inhibieren könnten. Japanische Forscher benutzten für die Untersuchungen Wasser aus einem Teich mit bestimmten Spirochäten … Eine Stahlrasierklinge blieb in der Flüssigkeit mit einem Zusatz von Salvarsan noch nach Tagen bei 15 Grad rostfrei. Dagegen bildete sich in der Flüssigkeit ohne Salvarsan nach zehn Stunden Rost. Das gleiche konnte mit Penicillin erzielt werden. Die Wissenschaftler empfehlen, Inhibitoren gegen Eisenkorrosionen unter den Arzneimitteln zu suchen.« *Orion, 12. Jg., Nr. 6, S. 497, Juni 1957*

Seilschaukel für das Auto

»Trag- und Spielsitze für Kleinkinder sind schon immer bei den Eltern sehr beliebt gewesen. Noch mehr Möglichkeiten und Entlastung für die Aufsichtsperson soll der Walter-Kindersitz bieten, der … dem Kind im Auto einen festen Halt und gute Sicht verschafft. Weitere Anwendungen findet er als Rücksitz auf dem Fahrrad, als Seilschaukel, als Stuhl mit Leichtmetallbeinen und Spieltisch, als Tischsitz am 5 cm breiten Tischrand angeschraubt, wobei die Auflagefläche der Klemmvorrichtung mit Gummi belegt ist. Sein geringes Gewicht erlaubt es, daß man ihn stets mitnehmen kann.« *Umschau, 57. Jg., Heft 11, S. 349, Juni 1957*

Tabakrauch zur Desinfektion?

»Tabakrauch ist hinsichtlich seiner Wirkung auf die Gesundheit so viel Uebles nachgesagt worden, daß es als Forderung der Gerechtigkeit erscheint, auch nach seinen guten Eigenschaften zu fragen. Seine Giftstoffe wirken nicht nur auf den Zustand des Menschen … sondern auch auf die zum Teil nichtsnutzigen Kleinwesen, die wir in uns beherbergen. Da viele Bakterien durch die Atmungswege aufgenommen werden, ist anzunehmen, daß der Tabakrauch sie … möglicherweise vernichtet. Dr. Arnold … hat Röhren mit Bakterien beschickt und der Wirkung von Tabakrauch ausgesetzt. Bazillen der Diphtheritis stellten zuweilen ihr Wachstum ein oder setzten es nur in geringem Grade fort.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 118, S. 351, Juni 1907*

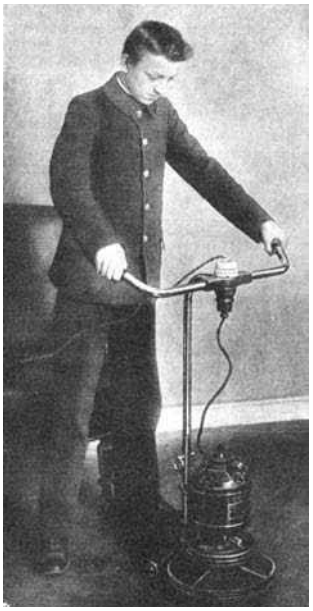
Frühform des Tetrapack

»Ein neuer Industriezweig ist in Amerika im Entstehen, welcher die Fabrikation von Papierflaschen zum Zwecke hat. Die Flaschen besitzen bedeutende Festigkeit. Als Rohmaterial dient Holzstoff. Die Herstellung der Nähte ist Fabrikgeheimnis. Um … das Durchsickern zu verhüten, werden die Papierflaschen innen und außen mit einem Paraffinüberzug versehen. Ebenso sind auch die Verschlußkappen paraffiniert, was einen hermetischen Anschluß an die Flaschenwandungen herbeiführt. In erster Linie will man die Papierflaschen in der Nahrungsmittelbranche einführen, ganz besonders im Milchhandel.« *Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, 13. Jg., Nr. 11, S. 364, Juni 1907*

1907

Blitzbohner

»Zu den mechanischen, die mühsame und ungesunde Handarbeit allmählich verdrängenden Reinigungsvorrichtungen für Innenräume gesellt sich seit kurzer Zeit ein elektrisch betriebener Apparat, der, als ›Blitzbohner‹ bezeichnet, zur Pflege des Parketts, Linoleumbelags usw. … schon vielfach Anwendung findet. Die dem Fußboden aufliegende kreisrunde Bürste wird von der vertikalen Achse eines Elektromotors in Bewegung gesetzt, der Strom durch eine Zuleitungsschnur von irgendeinem Wandauslaß erhält. … Nach Angabe sollen in einem hiesigen Kaufhaus zwei Angestellte mit dieser Vorrichtung dieselbe Fläche in kürzerer Zeit bohnern als früher 20 Personen auf die bisher übliche Weise.« *Mitteilungen der Berliner Elektricitäts-Werke, 3. Jg., Nr. 6, S. 93, Juni 1907*



▲ Maschine verdrängt Mensch – neuer »Blitzbohner« ersetzt nahezu eine komplette Putzkolonne.

Die Sprache der Wahrnehmung

Die neuronale Kodierung von Sinnesinformationen untersuchen viele Forscher am Tastsinn von Ratten. Die Nager beurteilen mit ihren Tasthaaren an der Schnauze blitzschnell etwa die Weite eines Durchschlupfs.

Von Miguel A. L. Nicolelis und Sidarta Ribeiro

Esche enttäuscht uns nicht. Als die Türen zur stockdunklen Kammer aufgleiten, huscht sie sofort hinein. In vollem Tempo flitzt sie zur gegenüberliegenden Wand – wo sie vermutlich die gewohnte Belohnung zu finden glaubt, hat sie unsere Aufgaben nach wochenlangem hartem Üben doch zuletzt hervorragend gemeistert.

Auf halbem Weg muss Esche durch eine schmale Öffnung in einer Trennwand rennen, deren Weite wir jedes Mal ein wenig verstellen. Ihre Aufgabe: Sie soll auf Anhieb bewerten – durch Wahl der richtigen Futterstelle –, ob die Lücke diesmal breiter oder enger ist als beim vorangegangenen Versuch. Trotz der totalen Dunkelheit gelingt ihr das hervorragend, allein mit Hilfe ihrer Schnurrhaare.

Denn Esche ist eine Ratte. Berührungen an den Spitzen ihrer Vibrissen spürt sie so genau, dass sie noch Unterschiede der Durchgangsweite von wenigen Millimetern in kaum 150 Millisekunden korrekt erfasst. In neun von zehn Fällen läuft sie danach ohne jedes Zögern zur richtigen Futterstelle.

An der Basis eines jeden Spürhaars sitzen dicht bei dicht viele so genannte Mechanorezeptoren. Solche Tastsinnesorgane übersetzen die wichtigen Merkmale eines Berührungsreizes – ob bei Nager oder Mensch – in eine Sprache, die das Gehirn versteht: Elektrizität. Eine Fülle peripherer Nerven übermittelt die elektrischen Signale dem Zentralnervensystem – genauer dem somatosensorischen System, einem riesigen neuronalen Schaltkreis aus etlichen untereinander vernetzten Hirnstrukturen. Auch beim Menschen gewährleistet dieses System die vielfältigen Tastempfindungen. Nicht zuletzt trägt es zur Eigenwahrnehmung, zum Gefühl von unser selbst bei.

Lange galt es in den Neurowissenschaften als zutiefst rätselhaft, ja unergründlich, wie das Gehirn elektrische Impulse in derart feine und vielfältige Wahrnehmungen überträgt. Diesen neuronalen Kode aufzubrechen heißt die Türen zum Verständnis unseres Innersten, unseres tiefsten Wesens zu öffnen. Wenn wir sprechen, lieben, hassen können, wie wir die Welt um uns herum wahrnehmen, auch unsere Erinnerungen, Träume, selbst die Geschichte unserer Art – das alles beruht auf dem Zusammenspiel einer Fülle von elektrischen Signalen, die wie plötzliche Stürme durch das Gehirn fegen. ▷

Ratten zeigen uns, wie auch unser Gehirn Wahrnehmungen erzeugt.

PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

In Kürze

▶ Seit Jahrzehnten möchten Hirnforscher verstehen, wie das Gehirn die Fluten **elektrischer Impulse**, die über seine Nervenzellen strömen, in Gedanken, Gefühle und Empfindungen übersetzt. Neurophysiologen sprechen salopp von der Suche nach dem **neuronalen Kode**.

▶ Früher vermuteten sie, dass bei einer **Sinneswahrnehmung** die einzelnen Signale auf streng getrennten Bahnen in die höheren Hirnzentren gelangen. Doch offenbar wird die Information schon auf dem Weg dahin von **Neuronen-Ensembles** aus weit verteilten Zellen komplex verschlüsselt.

▷ Das Experiment, an dem Esche teilnimmt, gilt der Kernfrage nach dem neuronalen Kode. Es ist nur natürlich, dass sie bei der ihr gestellten Aufgabe ihre Schnurrhaare benutzt. Einer Katze vermag eine Ratte meist nur zu entkommen, wenn sie blitzschnell in einem Loch oder einem engen Winkel verschwindet. Oft dürfte das eine unvertraute dunkle Ecke sein. Ob es dort eine Ritze gibt, durch die sie passt, verraten ihr die Empfindungen über ihre Vibrissen.

Die Rezeptoren an der Haarbasis übersetzen jede winzige Abbiegung des Haars in schnelle Folgen kleiner elektrischer Entladungen, so genannter Aktionspotenziale – neuronaler Impulse, die über Nervenfasern ins Gehirn gelangen. Diese Entladungen signalisieren Ort, Intensität und Dauer des Berührungsreizes. Die Weiterleitung geschieht über das Trigeminussystem, das zum somatosensorischen System gehört und darauf spezialisiert ist, taktile Signale aus dem Gesicht weiterzuschicken und zu verarbeiten. (Trigeminus heißt ein wichtiger, verzweigter Nerv des Gesichts). Wie aber können Ratten dank des Trigeminussystems in Sekundenbruchteilen die Weite einer Öffnung berechnen? Wie gelingt es den riesigen Zellpopulationen dieses Neuronennetzes festzustellen, welche sensorische Information vorliegt? Kurz, wie verarbeiten sie den Reiz?

Und weiter – allgemeiner – gefragt: Wie muss man sich die neuronale Kodierung, die Repräsentation von Sinnesinformationen, vorstellen? Welchen Gesetzmäßigkeiten oder Regeln folgt das Gehirn dabei? Das Trigeminussystem von Nagetieren untersuchen Neurophysiologen mit solchen Fragestellungen seit Anfang der 1970er Jahre. Weltweit arbeiten viele Wissenschaftler auf diesem Feld. Die im Verlauf der Jahre gewonnenen Einblicke und davon abgeleiteten Hypothesen zeigen, wie stark sich das Gebiet entwickelte – aber auch, wie viel wir noch nicht wissen.

Vor dreißig Jahren hielten die meisten Neurowissenschaftler für wahrscheinlich, dass Sinnesinformationen, die der Körper von der Außenwelt aufnimmt, weit gehend streng getrennt bis zur Hirnrinde gelangen, sozusagen über viele parallele Nervenbahnen. (Im Fachjargon heißt jene Vorstellung »labeled-line model«, was definierte feste Wege meint). Nach dieser Auffassung würde die Botschaft über eine strikte Vorwärtsverschaltung vom Sinnesorgan geradewegs bis in die höheren Hirnstrukturen übermittelt.

Während der 1970er Jahre erhielt der Denkansatz durch Arbeiten von Tom Woolsey und Hendrik Van der Loos Auftrieb. Die Neuroanatomen von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) untersuchten an Mäusen die primäre sensorische Hirnrinde – den primären sensorischen Kortex (S1) –, eine wichtige Instanz der Wahrnehmung. Es schien, als hätten die Forscher die dort ankommenden Bahnen des Trigeminussystems gefunden.

Die Großhirnrinde eines Säugetiers lässt sich in sechs Schichten gliedern, die man von außen nach innen von I bis VI nummeriert. Jede Schicht zeichnet sich durch eine bestimmte Verteilung und Verflechtung von Nervenzelltypen aus. Woolsey und Van der Loos schnitten die gesamte sensorische Rinde der Nager in feine Scheiben, die sie anfärbten. Durch die Färbung konnten sie ein spezielles Enzym nachweisen, das auf hohe Zellaktivität hinweist.

Eine Überraschung bot die Schicht IV. Dort waren zahlreiche separierte Nester von Nervenzellen mit Enzymaktivität zu erkennen, jedes Nest tonnen- oder fassförmig und dicht gepackt mit tausenden Neuronen. Diese Nester waren zudem in deutlich erkennbaren Reihen und Säulen angeordnet. Die Forscher tauften das Ganze Tonnen- oder Tönnchenfeld (englisch »barrel-field«). Die Fässchen bilden zusammen ein wunderschönes Muster, das faszinierenderweise wie eine leicht verzerrte topografische Karte von der Oberfläche der Mäuseschnauze mit ihren Schnurrhaaren aussieht.

Landkarten im Gehirn

Später fand sich eine ähnliche Anordnung ebenso bei Ratten (siehe Bilder rechts). Zudem förderten weitere Studien auch auf anderen, subkortikalen Stationen der Sinnesbahn solche Muster gemäß der Anordnung der Schnauzenhaare zu Tage, so im Hirnstamm und im Thalamus. (Die dortigen Nester nannten die Forscher Barrelets beziehungsweise Barreloide.) Andere Wissenschaftler wiesen dann tatsächlich nach, dass die Information von den einzelnen Tastrezeptoren der Schnurrhaare über die Schaltstationen solcherart gewissermaßen gestaffelt bis zur primären sensorischen Hirnrinde weitergeleitet wird.

Den Bereich der Haut (oder allgemeiner den Bereich eines Sinnesorgans oder Sinnesfelds), bei dessen Stimulation eine bestimmte Hirnzelle anspricht, bezeichnen Neurophysiologen als das rezeptive Feld, den Einzugsbereich, dieses Neu-

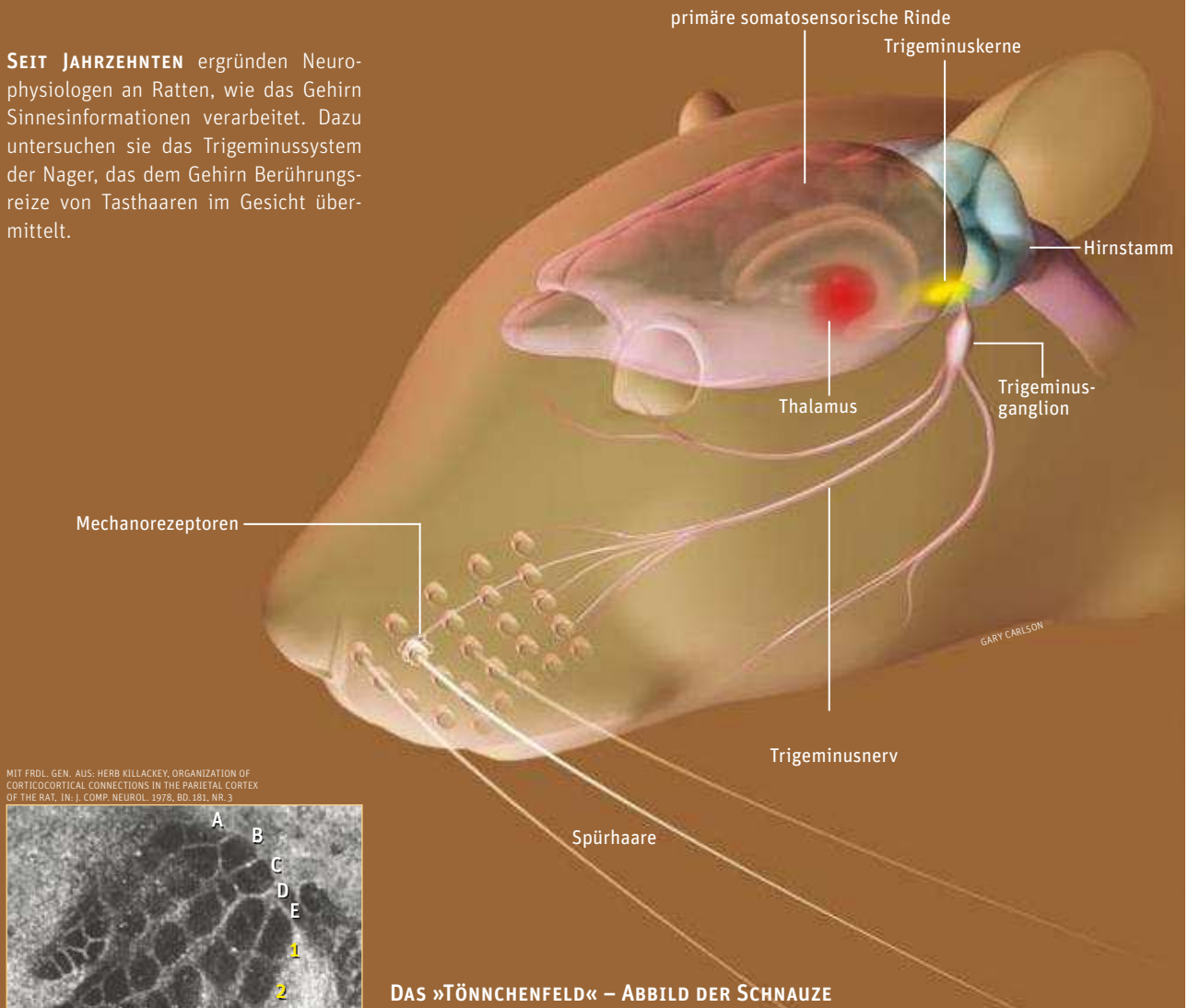
MIGUEL A. L. NICOLELIS

Der Schnitt von der Hirnrinde einer Ratte zeigt die typische Schichtung.

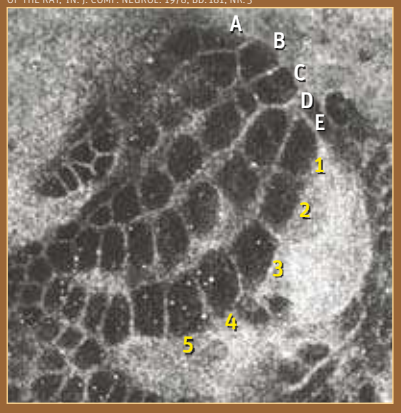
Früher glaubten Forscher, Sinnesdaten würden auf streng getrennten Bahnen geradewegs bis in die primären sensorischen Hirnrindenfelder übermittelt

Ratten als Modell in der Hirnforschung

Seit Jahrzehnten ergründen Neurophysiologen an Ratten, wie das Gehirn Sinnesinformationen verarbeitet. Dazu untersuchen sie das Trigeminussystem der Nager, das dem Gehirn Berührungsreize von Tasthaaren im Gesicht übermittelt.



MIT FRDL. GEN. AUS: HERB KILLACKEY, ORGANIZATION OF CORTICOCORTICAL CONNECTIONS IN THE PARIETAL CORTEX OF THE RAT. IN: J. COMP. NEUROL. 1978, BD. 181, NR. 3



Das »Tönnchenfeld« – Abbild der Schnauze
In den 1970er Jahren entdeckten Hirnforscher, dass sich das Sinnesgebiet der Schnurrhaare als topografische Karte in der Hirnrinde spiegelt. Nur leicht verzerrt entspricht der Position jedes Schnurrhaars eine fassförmige Ansammlung von Nervenzellen in der primären somatosensorischen Hirnrinde auf der jeweils anderen Körperseite. Die eingezeichneten Buchstaben stehen für die Reihen, die Zahlen für die Säulen der einzelnen Schnauzenhaare.

rons. Die wichtigste Vorhersage des Modells einer strengen, nach Information getrennten Vorwärtsleitung im somatosensorischen System von Nagetieren war: Der Einzugsbereich der einzelnen Zellen in den Tönnchen sollte auf jeweils ein bestimmtes Schnurrhaar beschränkt sein.

Erst in den späten 1980er Jahren weckten neue Befunde Zweifel an dieser schönen Vorstellung. Beispielsweise registrierte der Neurophysiologe Michael Armstrong-James, damals an der Universität London, die Reaktion einzelner Tönnchenzellen in der Hirnrinde betäubter Ratten, wenn Tasthaare auf der Schnauze abgebogen werden. Er prüfte Neuronen von vielen Tönnchen. Zwar fand er fast immer das hauptsächliche Spürhaar, zu dem die anvisierte Hirnzelle sozusagen gehörte – auf das sie stark ansprach. Allerdings wies er auch nach, dass das einzelne Neuron außerdem bei Berührung von benachbarten Vibrissen ebenfalls zu antworten vermochte.

Armstrong-James' Folgerung war damals fast ketzerisch. Er postulierte, das rezeptive Feld auf der Schnauze für die einzelnen Neuronen im Tonnenfeld der Hirnrinde sei größer als bisher angenommen. Es würde außer dem Hauptsinneshaar jeweils noch einige danebenstehende Schnurrhaare umfassen. Die Reaktion für die Randbezirke sei zwar schwächer und verzögert, aber eindeutig. Unter den Experten löste das eine heftige Auseinandersetzung aus, die eine Dekade des Umdenkens einleitete.

Armstrong-James hatte jeweils die Aktivität einzelner Nervenzellen gemessen, das heißt verschiedene Zellen zeitlich nacheinander beobachtet. Das war auch noch weit gehend die übliche Vor- ▷

▷ gehensweise, als einer von uns (Nicolelis) und John K. Chapin (heute an der Staatsuniversität von New York) sich 1989 entschlossen, mit einer neuen Methode die Einzelaktivität vieler Neuronen gleichzeitig zu belauschen.

Zunächst konzentrierten wir uns auf einen bestimmten Thalamuskern. Von dorther ziehen die meisten der aufsteigenden Verbindungen hoch, die das Tönnchenfeld in der primären somatosensorischen Hirnrinde erreichen. Jener Kern, der VPM *(Nucleus ventralis posteromedialis)*, weist, wie vorn erwähnt, ebenfalls Zellnester auf, Barreloide genannt. Wir erkannten bald, dass die VPM-Neuronen auf der Rattenschnauze sehr große rezeptive Felder haben, welche etliche Spürhaare umfassen. Wie es Armstrong-James auch schon für die Hirnrinde gezeigt hatte, besitzt jede der VPM-Zellen ihre Hauptvibrisse. Wurde die bewegt, feuerte das Neuron am schnellsten und stärksten. Das definierte das Zentrum ihres Einzugsbereichs. Scherten die benachbarten Tasthaare aus, erregte das die Zelle weniger und langsamer.

Sinnesfelder sind nicht starr

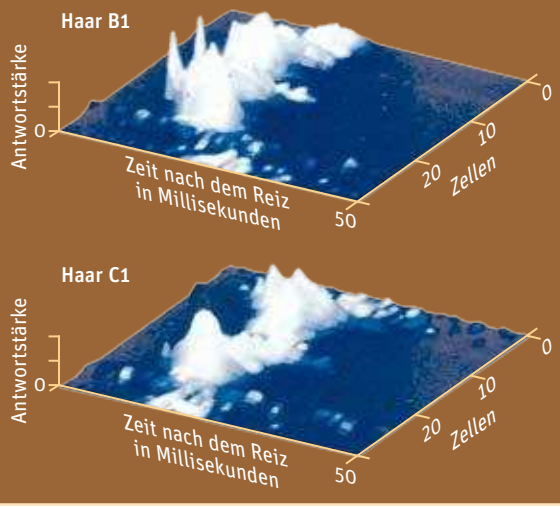
Wie weit die rezeptiven Felder von VPM-Neuronen reichen können, zeigte sich, wenn die Ratten langsam aus der Narkose erwachten und schließlich völlig wach waren. (Solche Studien sind möglich, weil das Gehirn selbst schmerzunempfindlich ist.) Dann vergrößerten sich die Sinnesfelder für die einzelnen Neuronen im Thalamus nämlich deutlich. Manchmal umfassten sie fast alle Sinneshaare auf einer Gesichtshälfte. Es ist sogar noch komplizierter. Auf die Abbiegung verschiedener Haare in ihrem Feld reagiert eine VPM-Nervenzelle mit unterschiedlicher Zeitverzögerung – was bedeutet, dass sich ihr Einzugsbereich zeitabhängig verschiebt. Genau genommen lassen sich das Zentrum und die Grenzen eines rezeptiven Felds also generell gar nicht angeben, sondern man kann es nur jeweils für einen bestimmten Zeitpunkt nach der Reizung definieren (Kasten unten, links und Mitte).

Dank dieser räumlich-zeitlichen Dynamik können sich die Neuronen sofort neu organisieren, wenn sich der Informationsfluss aus dem Gesicht aus irgendwelchen Gründen verändert. Wir haben zum Beispiel kleine Hautbezirke an der Schnauze der Ratte betäubt. Schon nach ein paar Sekunden glichen die Ratten das aus: VPM-Neuronen im Thalamus horchten jetzt auf ganz andere rezeptive Felder als vorher.

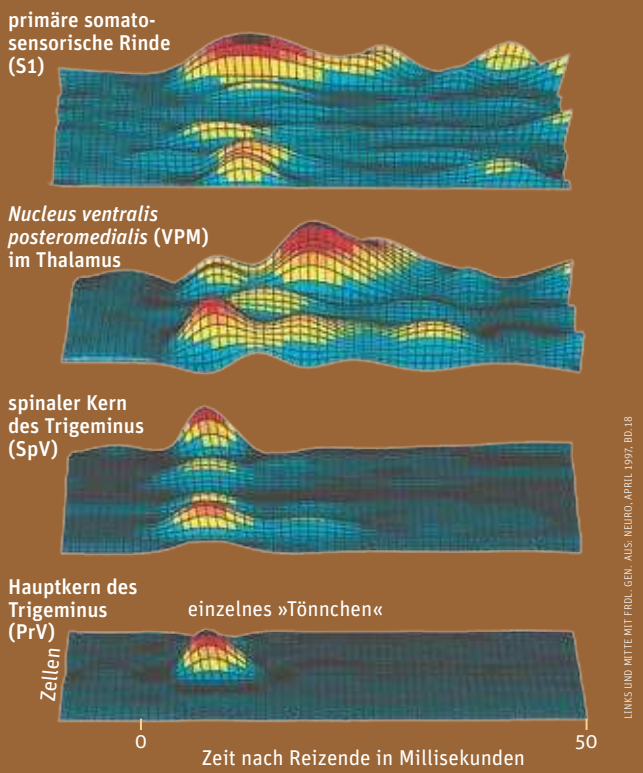
Wie Schnurrhaare mit dem Gehirn reden

Bei Reizung eines einzelnen Spürhaars der Rattenschnauze antworten viele Hirnzellen aus verschiedenen Zellpopulationen des Trigeminussystems. Komplexe räumlich-zeitliche Erregungsmuster von weit verteilten Zellkollektiven verschlüsseln die Sinnesinformation.

Reaktionen von Zellen der Hirnrinde aus verschiedenen Zellnestern
Hier (»Wolkenbilder« unten) wurde jeweils ein Tasthaar der Rattenschnauze gereizt. Das erregt im Tönnchenfeld der primären sensorischen Hirnrinde nicht nur Zellen vom »eigenen« Tönnchen, sondern auch solche von anderen dieser Zellnester. Das Verhalten von 25 getrennten Zellen wurde beobachtet. Es ist in übereinander verlaufenden Zeilen dargestellt. Die einzelnen Neuronen reagierten auf Reizung des Haars B1 anders als auf die von Haar C1.



Reaktionen auf verschiedenen Schaltstationen jeweils in einem Tönnchen-Zellhaufen pro Station
Hier wurde ein einzelnes Tasthaar der Rattenschnauze berührt. Dabei ist die Antwortstärke von Neuronengruppen verschiedener Verschaltungsebenen des Trigeminussystems im Zeitverlauf erfasst. Die Zellen jeder Station gehörten jeweils zum selben fassförmigen Zellnest.



LINKS UND MITTE MIT FRDL. GEN. AUS: NEURO, APRIL 1997, BD.18

Weil wir das Phänomen genauer verstehen wollten, versuchten wir es mit einem technisch noch aufwändigeren Ansatz. Wir griffen gleichzeitig Aktivitäten von bis zu 48 einzelnen Neuronen ab, die sich auf mehrere Verschaltungsstationen des Trigeminussystems verteilten. Die Zellen lagen, auf bis zu fünf verschiedene Stationen verteilt, im Hirnstamm, im Thalamus und in der Hirnrinde der Ratten.

Erstmalig konnten Abläufe auf einer Sinnesbahn in dieser räumlichen Ausdehnung und von solcher Aussagekraft aufgezeichnet werden. Das Ergebnis war deutlich, jedoch für viele Hirnforscher ein Schock: Die Beugung eines einzelnen Schnurrhaars von wachen Tieren erzeugte komplexe Wellen elektrischer Aktivität. Auf jeder Verschaltungsstation des Trigeminussystems erfassten diese Wellen viele der distinkten tonnenförmigen Nervenzellnester (siehe Kasten unten, links). Statt dass die Sinnesinformation über festliegende, getrennte Bahnen lief, sah es so aus, als würden ganze Zellpopulationen die Information aufnehmen, als würde die Botschaft über viele Neuronen verteilt. Erst indem große Populationen von individuell reagierenden Hirnzellen zusammenwirken, scheint es das Rattengehirn leisten zu können, genau herauszuarbeiten, was ein taktiler Reiz über die nächste Umgebung des Tieres besagt.

Mitte der 1990er Jahre versuchte unser Mitarbeiter Asif Ghazanfar mittels Simulation mit künstlichen neuronalen Netzen zu »lesen«, welche kodierte Botschaft die Trigeminus-Neuronenpopulationen der Ratten wohl verschicken. Dazu verwendete er die Aktivität vieler Hirnrindenzellen, die bei mechanischer Reizung diverser einzelner Spürhaare aufgezeichnet worden war. Diese Daten übertrug er auf eine Reihe künstlicher Muster erkennender Algorithmen.

Zunächst schulte er einen Algorithmus, die räumlich-zeitlichen Entladungsmuster kompletter Populationen von Rindenneuronen der Berührung einzelner Spürhaare zuzuordnen. Als das künstliche neuronale Netz ein hohes Maß an Genauigkeit erzielte, fütterte Ghazanfar einen neuen Datensatz ein und erprobte nun, wie präzis das System erkannte, welches der Haare bei dieser Rindenaktivität gereizt worden war. Wurden die Algorithmen mit der Aktivität von Einzelneuronen versorgt, schafften sie die Aufgabe ziemlich schlecht. Dagegen erreichten sie hohe Genauigkeit, wenn ihnen die gesamten Antworten von Populationen individueller Zellen zur Verfügung standen. Dazu genügte ein einziger Durchlauf.

Zu der Zeit erzielten andere Forschergruppen – mit verschiedenen Methoden – Ergebnisse, die unsere elektrophysiologischen Befunde zur neuronalen Kodierung stützten. Ghazanfar gelang als Nächstes zusammen mit David Krupa der erste Nachweis, dass die VPM-Neuronen im Thalamus anders antworten, wenn man die Zellen der primären sensorischen Rinde blockiert. Anscheinend schickt die Hirnrinde demnach auch Signale zum Thalamus zurück. Solche Rückkopplung könnte wichtig sein, um die Information vom Sinnesorgan, die der Hirnstamm hochschickt, zu modulieren. Verschiedene Befunde dieser Art ließen unser Team postulieren, dass das hochdynamische Verhalten der Neuronen sowohl der sensorischen Rinde als auch des Thalamus, das aus der Stimulation vieler Spürhaare zugleich resultiert, darauf beruht, dass diese Hirnzellen von vielen Seiten Signale erhalten: und zwar nicht nur von »unten« und »oben« – über die auf- und absteigenden Bahnen –, sondern auch aus anderen Richtungen, etwa über gegenseitige und modulierende Verbindungen. Diese vielfältigen Signale treffen bei einem Neuron zu verschiedenen Zeitpunkten ein, was bewirkt, dass sie dessen Verhalten sehr vielfältig beeinflussen (siehe Kasten unten, rechts).

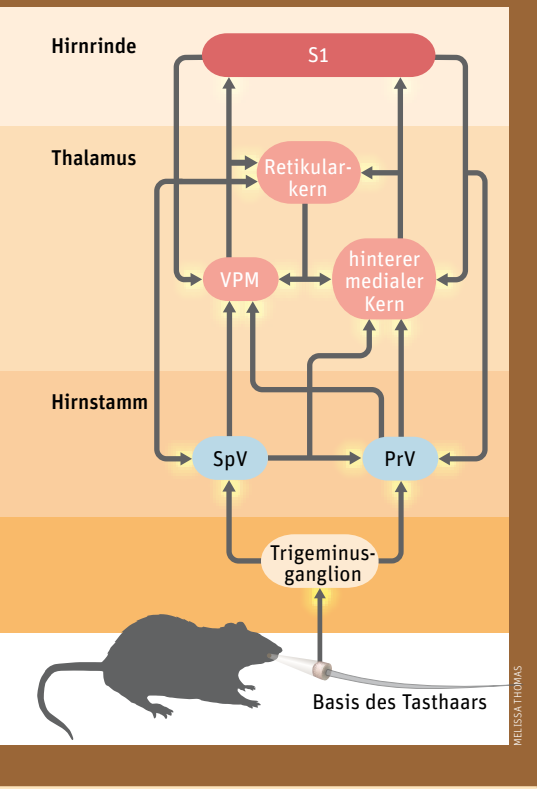
Die Spur der Tasthaare

Zwar zeigten diese Befunde schon deutlich, dass die Information von taktilen Sinnesreizen nicht über eine reine Vorwärtsverschaltung zur sensorischen Rinde gelangt. Allerdings forderte das neue Modell einer asynchronen Konvergenz (zeitlich versetzten Zusammenführung) viele Annahmen, die experimenteller Überprüfung bedurften. So begann ein weiteres Jahrzehnt mit neu erdachten Studien dazu, was Ratten mit ihren Vibrissen so alles leisten.

Ein raffiniertes Verfahren erdachte unsere Mitarbeiterin Erika Fanselow 1998. Es gelang ihr damit zu erfassen, wie die Zellen der primären sensorischen Rinde und des VPM ansprechen, wenn eine sich frei bewegende Ratte die gleichen taktilen Reize in verschiedenen Verhaltenssituationen erlebt. Die Forscherin legte eine feine Manschettenelektrode um den Ast des Trigeminusnervs, der die Tastsignale von den Spürhaaren zum Gehirn leitet. So konnte sie dem Nerv sehr genaue elektrische Impulse verpassen – und gleichzeitig die Aktivitäten der zugehörigen Zellen in der Hirnrinde und im Thalamus messen.

Interessanterweise reagierten die Nervenzellen völlig verschieden, je nachdem ob das Tier gerade die Sinneshaare zum Tasten bewegte oder nicht – weil es entweder ruhte oder betäubt war. Bei einer ruhigen wachen Ratte antworteten Neuronen beider Gruppen auf einen Einzelreiz klassisch mit einer kurzen Impulsfolge und verstummten dann einige Zeit. Veränderungen an ihren Zellmembranen hemmten sie vorübergehend. Bewegte das Tier jedoch seine Schnurrhaare, wie ▷

Komplexe Signalverarbeitung
Im Trigeminussystem werden einlaufende Tastsignale von einem Schnurrhaar auf dem Weg zur primären sensorischen Hirnrinde vielfältig moduliert.



▷ und warum auch immer, traten solche Hemmzeiten nicht auf. Die Zellen von Thalamus und Hirnrinde antworteten anhaltender.

Um das genauer zu untersuchen, testete die Forscherin die Reaktion auf zwei elektrische Reize hintereinander – und beobachtete Verblüffendes. Denn nun sprachen die Zellen beider Hirninstanzen beim wachen Tier, das seine Vibrissen still hielt, nur auf den ersten Reiz an. Der zweite Stimulus wurde offenbar durch Hemmung maskiert. Ganz anders die Reaktion, wenn die Ratte ihre Schnurrhaare bewegte: Jetzt antworteten sowohl die Zellen in der sensorischen Rinde als auch im Thalamus gut auf beide künstlichen Impulse. Das taten sie sogar noch bei einem Abstand von nur 25 Millisekunden zwischen beiden Reizen. Dadurch, dass die Ratte die Spürhaare betätigte, veränderten sich ganz offensichtlich die Eigenschaften der Nervenzellen. Solches Verhalten verhilft somit dazu, aufeinanderfolgende Berührungsreize im Thalamus wie in der Hirnrinde zuverlässig abzubilden.

Ungefähr zur gleichen Zeit gelang es David Krupa allmählich, Ratten wie eingangs geschildert zu schulen – also ihnen beizubringen, im Dunkeln mit ihren Vibrissen ganz schnell zu fühlen, ob ein Durchschlupf weiter oder enger war als vorher, und das durch eine Verhaltensentscheidung kundzutun. Durch solche Tests hofften wir zu erfahren, was in lebensnäheren Situationen geschieht. Würden die genannten Neuronen erwartungsgemäß reagieren?

Vorgewarnte Hirnzellen

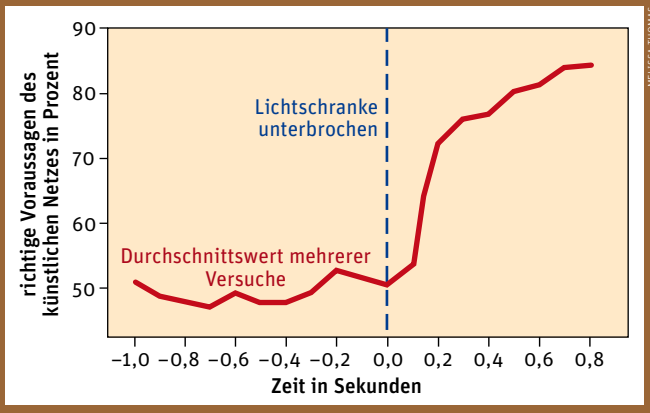
Tatsächlich feuerte in diesen Versuchen ein Großteil der Zellen im VPM des Thalamus und in der primären sensorischen Rinde heftig und lange, ohne dass eine Hemmung auftrat. Zudem entdeckte Krupa noch etwas Interessantes: Einige Neuronen des betreffenden Hirnrindengebiets veränderten ihre Aktivität schon im Voraus, bevor die Spürhaare überhaupt die Türöffnung berührten. Anscheinend beeinflusst schon, dass das Tier die Aufgabe erwartet, die Eigenschaften der Neuronen und bereitet sie auf die anstehende Arbeit vor.

Krupa testete diese Befunde schließlich auch noch mit einem künstlichen neuronalen Netz. Das war ein letzter Prüfstein dafür, ob die beobachteten Rückkopplungseffekte wirklich zur Kodierung der Sinnesinformation beitragen – ob die verschiedenen vorwärts- beziehungsweise zurückweisenden Signale nötig sind, um die Situation richtig zu bewerten. Auf das künstliche Netz übertrug Krupa die beim Verhaltensexperiment an den Neuronenpopulationen gemessenen räumlich-zeitlichen Entladungsmuster. Anhand der Aktivitätsmuster von gleichzeitig bis zu 50 Zellen der primären sensorischen Rinde konnte das System mit großer Genauigkeit vorhersagen, ob eine Ratte eine Türweite richtig beurteilen würde (Kasten unten).

Dass diese neuronalen Entladungsmuster genügten, um zu wissen, wie sich das Tier entscheiden würde, bedeutete offenbar: Wir waren auf dem richtigen Weg, die Sprache des Nervensystems deuten zu lernen. Die hervorragende Wahrnehmung von Säugetieren, so viel war einigermaßen deutlich, stützt sich nicht rein auf einzelne spezialisierte Neuronen, auch nicht allein auf hintereinandergeschaltete Module aus in Säulen angeordneten tonnenförmigen Nervenzellnestern. Eher scheint das Säugergehirn mit dyna-

Lesen im Rattengehirn

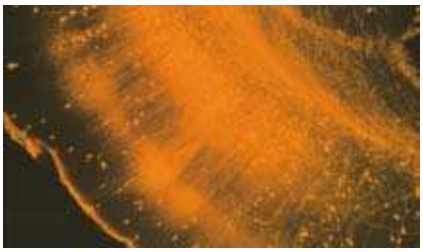
Ein künstliches neuronales Netz versteht, was eine Ratte wahrnimmt. Es registriert die Aktivitätsmuster von Hirnzellen des sensorischen Systems bei einem Tastsinnesreiz und weiß daraufhin, ob das Tier die Tastaufgabe besteht (Grafik unten). Fast sofort, nachdem die Ratte eine Lichtschranke an der zu bewertenden Öffnung passiert, fällt im künstlichen Netz die – zumeist richtige – Entscheidung. Vorher war die Entscheidung beliebig.



MELISSA THOMAS

AUS: DAVID J. KRUPA ET AL., SCIENCE, 25. JUNI 2004, BD. 304, S. 1989–1992

In diesem Test steckt die Ratte ihre Nase durch eine variable Öffnung. Allein mit den Vibrissen muss sie fühlen, ob die Spalte schmaler oder breiter ist als zuvor. Ihre Erkenntnis zeigt sie, indem sie sich an der richtigen von zwei Futterstellen eine Belohnung holt.



MIGUEL A.L. NICOLELIS

Das Säugetiergehirn arbeitet bei der Wahrnehmung mit dynamischen Zellensembles aus vielen, teils weit verstreuten Einzelneuronen

mischen Zellensembles zu arbeiten. Unter solchen Ensembles stellen sich die Hirnforscher das Zusammenspiel von vielen Einzelneuronen vor, die weit verteilt sein können und auf ein breites Spektrum von Signalfrequenzen ansprechen (breitbandig reagieren).

Welche Zellen zu einem Ensemble gehören, ändert sich wahrscheinlich fließend und kann sehr schnell wechseln. Das einzelne Neuron mag gleichzeitig in diverse solche Netze eingebunden sein. Auch können sich seine Entladungseigenschaften fortwährend verschieben. Dies hängt vom augenblicklichen Zustand des Sinnesorgans ab, von früheren Wahrnehmungserfahrungen sowie vom übrigen Geschehen im Gehirn. Wichtig ist auch, ob das Tier die Umweltinformation aktiv einholt oder sie passiv erfährt sowie, was es von der Situation erwartet.

Vom Gehirn zum Roboter

In den Grundzügen – im Aufbau, den physiologischen Abläufen und den Eigenschaften der Nervenzellen – gleichen sich die Gehirne von Ratten und Menschen. Wir erschließen uns unsere Umwelt über die Sinne in ähnlicher Weise mit Hilfe komplexer neuronaler Netze. Unser Gehirn erzeugt von ihr vielfache Abbilder (Repräsentationen). Was wir tatsächlich wahrnehmen, ändert sich in feinsten Graden immerzu, abhängig von Aufmerksamkeits-, Motivations- und Stimmungsschwankungen und vorausgegangenen Erlebnissen.

Trotzdem bleiben viele Fragen. Wie zum Beispiel können winzige Entladungen von Milliarden von Nervenzellen all solche Phänomene hervorbringen? Oder wie erreicht das Gehirn, dass wir uns untereinander im Verhalten oft einerseits so stark gleichen und doch jeder sein einzigartiges Leben führt?

Die meisten Neurowissenschaftler würden zustimmen, dass wir die komplexen Hintergründe dieser Zusammenhänge so schnell nicht klären werden. Dennoch können wir die Forschungsergebnisse, so unvollkommen sie sind, bereits praktisch nutzen. Es gelang uns, von der motorischen (Bewegungen veranlassenden) Hirnrinde von Affen neuronale Entladungsmuster abzugreifen und mit Computer-Algorithmen in Instruktionen zu übersetzen, durch die sich ein Roboterarm in Echtzeit kontrolliert bewegt (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 74; 9/2004, S. 12; und Spezial 1/2003, S. 46). Auch den umgekehrten Weg hoffen wir in naher Zukunft herzustellen: Beispielsweise könnte eine sensorbestückte Armprothese der somatosensorischen Hirnrinde – und damit dem Prothesenträger – ein taktiles Feed-back geben.

Geknackt ist der neuronale Kode, die Sprache des Gehirns, zwar noch lange nicht. Ein paar Silben gelingt es uns jedoch immerhin aufzufangen – und auch zu sprechen. Vor zehn Jahren war noch nicht einmal das möglich. Nicht zuletzt verdanken wir dies auch der dem Idiom des Gehirns zutiefst eigenen Anpassungsbereitschaft. Die hohe Plastizität rührt von den Netzeigenschaften im Kommunikationssystem der Nervenzellensembles her. Die Botschaft kommt an, selbst wenn einzelne Wörter verloren gehen, vergleichbar einem belastbaren technologischen Netz, das den Verlust von einzelnen Knoten schnell kompensiert.

Zu den Forschungserfolgen hat auch der Fortschritt der Labortechniken wesentlich beigetragen. Vor wenigen Jahrzehnten mussten sich Neurophysiologen noch mit den Signalen von einzelnen Nervenzellen begnügen – welche sie mit steifen Metallelektroden abgriffen, die bei stärkeren Bewegungen unter Umständen Hirngewebe schädigten. Die Forscher waren darum gezwungen, die Tiere während der Experimente zu betäuben oder mindestens zu sedieren und zu fixieren. Die Möglichkeit, das Gespräch von gleichzeitig Dutzenden von Zellen aus ganz verschiedenen Hirnstrukturen zu belauschen, erlaubte schließlich eine neue Sichtweise. Im Zentrum steht das Verhalten ganzer Zellpopulationen. Die Aktivitäten von bis zu 500 Neuronen auf einmal lassen sich heute aufzeichnen. Die biegsamen Elektroden sind fest fixiert und die Tiere können sich damit frei bewegen. Das erlaubt, über Monate an wachen Tieren Zellaktivitätsmuster bei normalem Verhalten zu erfassen.

Es erscheint verständlich, dass Hirnforscher mit den früheren Methoden die Aktivität von Einzelneuronen ins Zentrum stellten und lineare Verschaltungen postulierten. Aus heutiger Sicht wäre das mit der Situation eines Opernbesuchers vergleichbar, der während der Aufführung nur eine Solistenstimme hören kann. Der Auftritt dieses Sängers mag noch so bravurös sein – das Gesamtgeschehen erschließt sich bestenfalls mühsam. Die Hirnneuronen liefern erst in großen, weit verteilten Kollektiven genaue Beschreibungen der Außenwelt. Wenn eine Ratte einer Katze entkommt, spielt in ihrem Gehirn eine Sinfonie. ◁

Miguel A. L. Nicolelis hat die Anne-W.-Deane-Professur für Neurowissenschaft an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) und ist stellvertretender Leiter des Zentrums für Neuroengineering der Hochschule. **Sidarta Ribeiro** kam nach seiner Promotion in Nicolelis' Labor. Beide gehören, als gebürtige Brasilianer, zu den Mitbegründern des Internationalen Instituts für Neurowissenschaft in Natal in Nordost-Brasilien. Ribeiro ist wissenschaftlicher Leiter des dortigen Forschungs- und Schulungszentrums César Timo-Iaria (siehe: www.natalneuroscience.com).

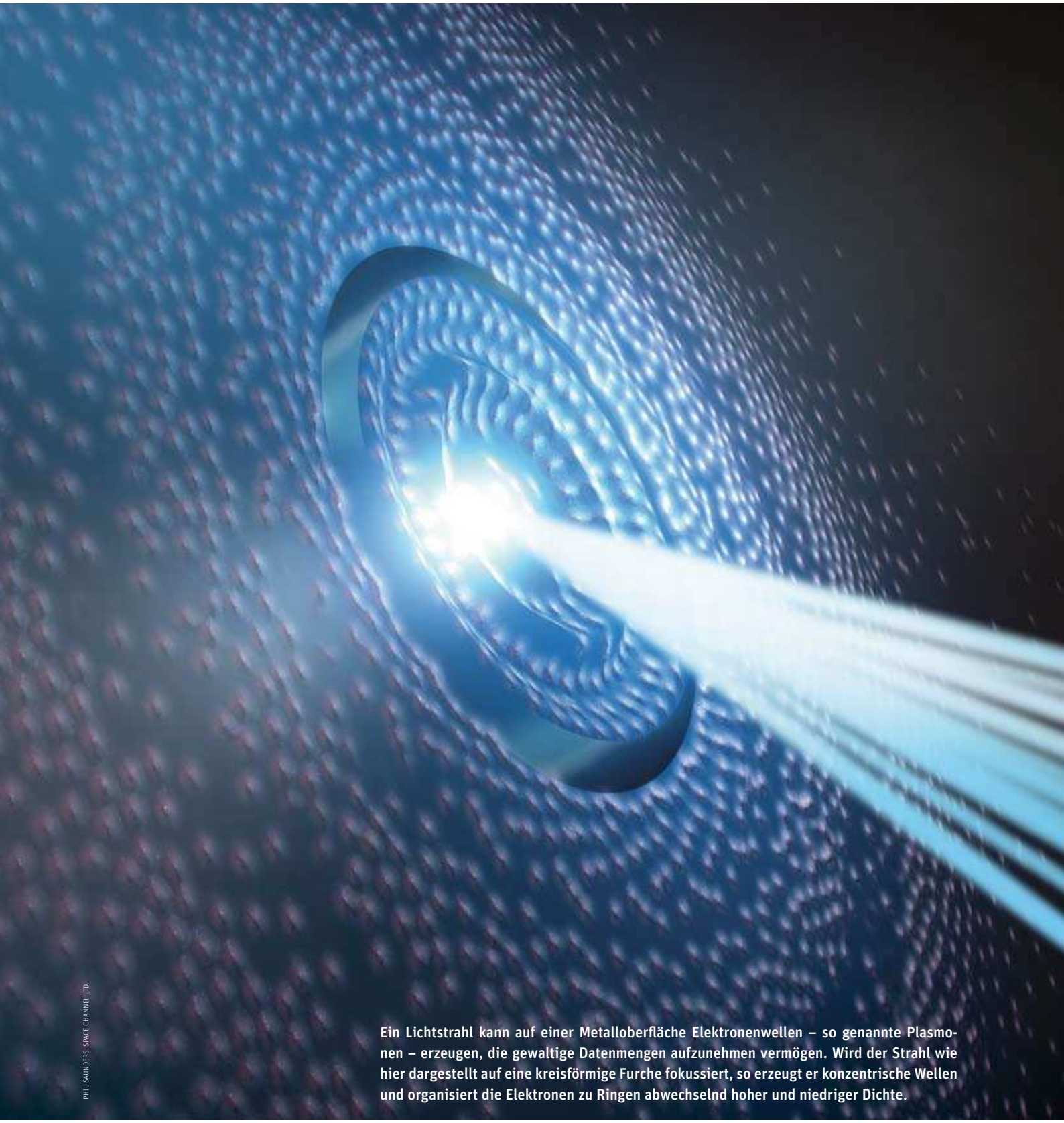
Layer-specific somatosensory cortical activation during active tactile discrimination. Von David J. Krupa et al. in: Science, Bd. 304, S. 1989, 25. Juni 2004

Computing with thalamocortical ensembles during different behavioural states. Von Miguel A. L. Nicolelis in: The Journal of Physiology, Bd. 566, 1. Juli 2005, S. 37

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Der Zauber der Plasmonik

Eine Technik, die elektromagnetische Wellen in winzige Strukturen zwängt, verspricht eine neue Generation ungeahnt schneller Computerchips sowie höchst empfindliche molekulare Detektoren. Sogar unsichtbar machende »Zaubermäntel« werden bereits erprobt.



PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

Ein Lichtstrahl kann auf einer Metalloberfläche Elektronenwellen – so genannte Plasmonen – erzeugen, die gewaltige Datenmengen aufzunehmen vermögen. Wird der Strahl wie hier dargestellt auf eine kreisförmige Furche fokussiert, so erzeugt er konzentrische Wellen und organisiert die Elektronen zu Ringen abwechselnd hoher und niedriger Dichte.

Von Harry A. Atwater

Licht ist ein wunderbarer Informationsträger. Glasfasern umspannen den Erdball und transportieren Lichtsignale, die gewaltige Ströme gesprochener Sprache und riesige Datenmengen mit sich führen. Auf Grund dieser gigantischen Kapazität prophezeien manche Forscher, dass photonische Geräte, die sichtbares Licht und andere elektromagnetische Wellen kanalisieren und manipulieren, eines Tages elektronischen Schaltkreisen in Mikroprozessoren und Computerchips den Rang ablaufen werden. Leider sind Größe und Leistung photonischer Apparate durch die Beugungsgrenze eingeschränkt: Da eng benachbarte Lichtwellen interferieren, muss der Durchmesser einer optischen Faser mindestens halb so groß sein wie die Lichtwellenlänge im Material. Für optische Signale auf Chips, die höchstwahrscheinlich im nahen Infrarot mit Wellenlängen von rund 1500 Nanometern (millionstel Millimetern) arbeiten werden, ist die minimale Dicke viel größer als die kleinsten heute gebräuchlichen elektronischen Bauteile; die Details einiger Transistoren in Silizium-Schaltkreisen sind kleiner als hundert Nanometer.

Doch seit Kurzem arbeiten Wissenschaftler an einer neuen Technik zur Übertragung optischer Signale durch winzige Strukturen im Nanobereich. In den 1980er Jahren wurde experimentell nachgewiesen, dass Lichtwellen, die sich in der Grenzfläche zwischen einem Metall und einem Dielektrikum – einem Nichtleiter wie Luft oder Glas – fortpflanzen, unter gewissen Bedingungen mit den freien Elektronen an der Metalloberfläche in Resonanz treten.

Das heißt, die Elektronenschwingungen an der Oberfläche entsprechen denen des elektromagnetischen Felds außerhalb des Metalls. Dadurch entstehen so genannte Oberflächenplasmonen – Dichtewellen von Elektronen, die sich entlang der Grenzfläche ausbreiten wie die Wellen auf einem See, nachdem man einen Stein ins Wasser geworfen hat. In den letzten zehn Jahren haben die Forscher herausgefunden, dass sie mit speziell ausgetüftelten Grenzflächen Oberflächenplasmonen erzeugen können, welche zwar dieselbe Frequenz haben wie die externen elektromagnetischen Wellen, aber eine viel kürzere Wellenlänge. Die fundamentale Beziehung Frequenz mal Wellenlänge gleich Fortpflanzungsgeschwindigkeit wird dabei nicht verletzt, denn die elektromagnetischen Wellen verlangsamen sich, während sie sich an der Metall-Dielektrikum-Grenzfläche entlang ausbreiten.

Plasmonen breiten sich aus wie die Wellen auf einem See, nachdem man einen Stein hineingeworfen hat

Solche Plasmonen könnten nanometerdünne Drähte – so genannte Interconnects – entlangwandern, die innerhalb eines Mikroprozessors Daten übertragen. Vor allem den Chipdesignern kämen plasmonische Interconnects sehr gelegen, denn während sie immer kleinere und schnellere Transistoren entwickeln, fällt es ihnen schwer, entsprechend winzige elektronische Schaltkreise für den schnellen Datentransport auf dem Chip zu bauen.

Im Jahr 2000 gab meine Gruppe am California Institute of Technology in Pasadena (kurz Caltech) dieser neuen Forschungsdisziplin den Namen Plasmonik. Letztendlich könnten plasmonische Bauteile die Leistung der unterschiedlichsten Instrumente verbessern: die Auflösung von Mikroskopen, den Wirkungsgrad von Licht emittierenden Dioden (LEDs) sowie die Empfindlichkeit chemischer und biologischer Detektoren. Für medizinische Zwecke lassen sich winzige Partikel konstruieren, die mittels plasmonischer Resonanz zum Beispiel Krebsgewebe zerstören. Einige Forscher verfolgen sogar die Idee, mit bestimmten plasmonischen Materialien das elektromagnetische Feld um einen Gegenstand derart zu verändern, dass er unsichtbar wird. Vielleicht sind nicht all diese Anwendungen praktikabel, aber das neue Gebiet wirft buchstäblich ein neues Licht auf die Geheimnisse der Nanowelt.

Vom Kirchenfenster zur Superlinse

Jahrtausendelang nutzten Alchimisten und Glasmacher unwissentlich plasmonische Effekte, als sie bunte Fenster und farbenfrohe Becher schufen, die im Glas kleine Metallpartikel enthielten. Ein besonders spektakuläres Beispiel ist der Lykurgos-Becher, ein römischer Kelch aus dem 4. Jahrhundert, der heute im Britischen Museum aufbewahrt wird (siehe Bild S. 65). Da die Elektronen der in der Glasmatrix verteilten Metallpartikel plasmonisch angeregt werden, absorbiert und streut der Becher blaues und grünes Licht – die eher kurzen Wellenlängen des optischen Spektrums. Im Auflicht erscheint der Kelch darum grünlich, doch wenn das Glas von innen weiß beleuchtet wird, glüht es rot auf, denn es absorbiert die kürzeren Wellenlängen und lässt nur die längeren durch.

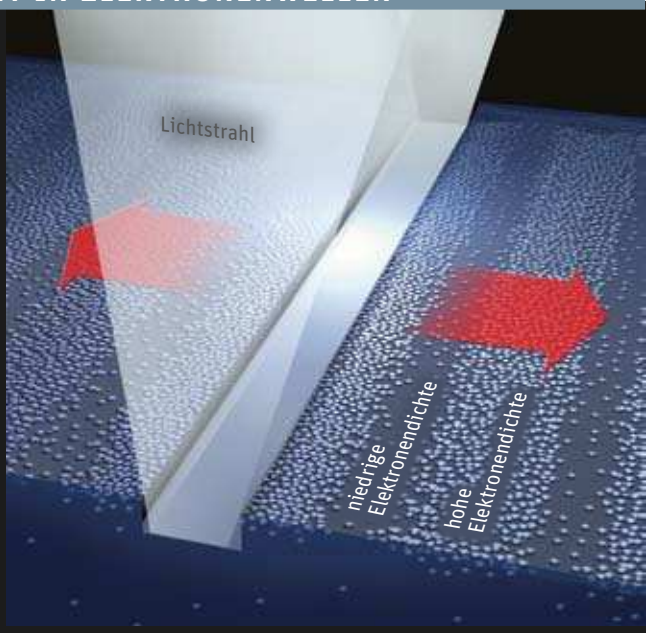
Systematisch werden Oberflächenplasmonen seit den 1980er Jahren erforscht. Damals verwendeten Chemiker dafür erstmals die Raman-Spektroskopie, bei der das an einer Probe gestreute Laserlicht Molekülschwingungen auslöst und mit seinem Spektrum Auskunft ▷

In Kürze

- Forscher haben entdeckt, dass sie **optische Signale in winzige Drähte quetschen** können, indem sie mittels Lichtstrahlen Elektronenwellen erzeugen – so genannte Plasmonen.
- **Plasmonische Schaltkreise** könnten in Computerchips blitzschnell große Datenmengen transportieren. Plasmonische Bauteile würden auch die Auflösung von Mikroskopen, den Wirkungsgrad von Leuchtdioden sowie die Empfindlichkeit chemischer und biologischer Detektoren verbessern.
- Einige Wissenschaftler träumen sogar von plasmonischen Materialien, die das elektromagnetische Feld rund um ein Objekt so stark verändern, dass es **unsichtbar** wird.

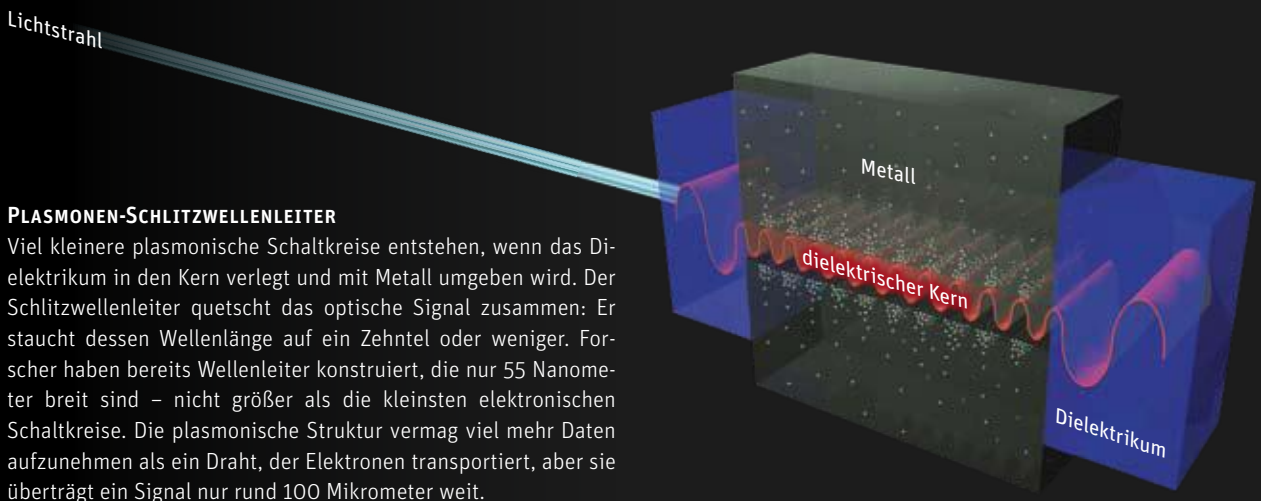
Winzige Strukturen verwandeln Licht in Elektronenwellen

Die Plasmonik ist ein relativ neues Gebiet, aber Forscher haben bereits viel versprechende Prototypen plasmonischer Bauteile entwickelt.



Ebener Wellenleiter

Plasmonen fließen stets längs der Grenze zwischen einem Metall und einem Dielektrikum – einem Nichtleiter wie Luft oder Glas. Wird Licht beispielsweise auf eine gerade Furche in einem Metall fokussiert, so entstehen Plasmonen, die sich in der Grenzschicht zwischen Metall und Luft knapp unterhalb der Metalloberfläche ausbreiten. Ein Plasmon kann sich in diesem ebenen Wellenleiter mehrere Zentimeter weit fortpflanzen und im Prinzip ein Signal von einem Teil eines Chips zum anderen übertragen. Doch die relativ große Welle würde im nanometerkleinen Innern eines Mikroprozessors mit anderen Signalen interferieren.

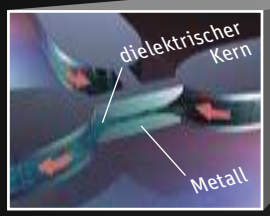


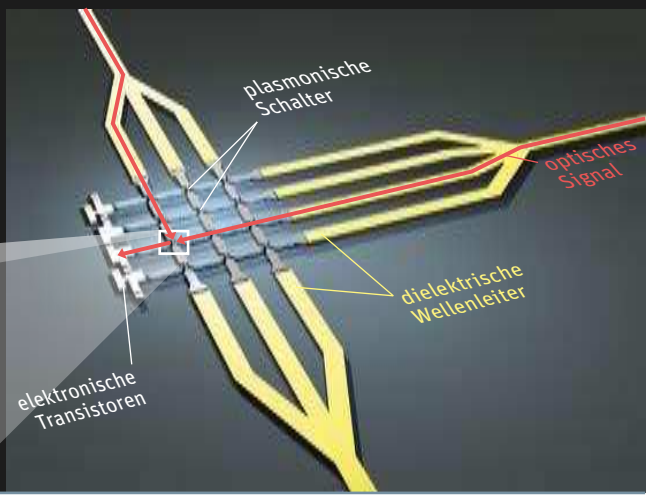
Plasmonen-Schlitzwellenleiter

Viel kleinere plasmonische Schaltkreise entstehen, wenn das Dielektrikum in den Kern verlegt und mit Metall umgeben wird. Der Schlitzwellenleiter quetscht das optische Signal zusammen: Er staucht dessen Wellenlänge auf ein Zehntel oder weniger. Forscher haben bereits Wellenleiter konstruiert, die nur 55 Nanometer breit sind – nicht größer als die kleinsten elektronischen Schaltkreise. Die plasmonische Struktur vermag viel mehr Daten aufzunehmen als ein Draht, der Elektronen transportiert, aber sie überträgt ein Signal nur rund 100 Mikrometer weit.

Ein schnellerer Chip

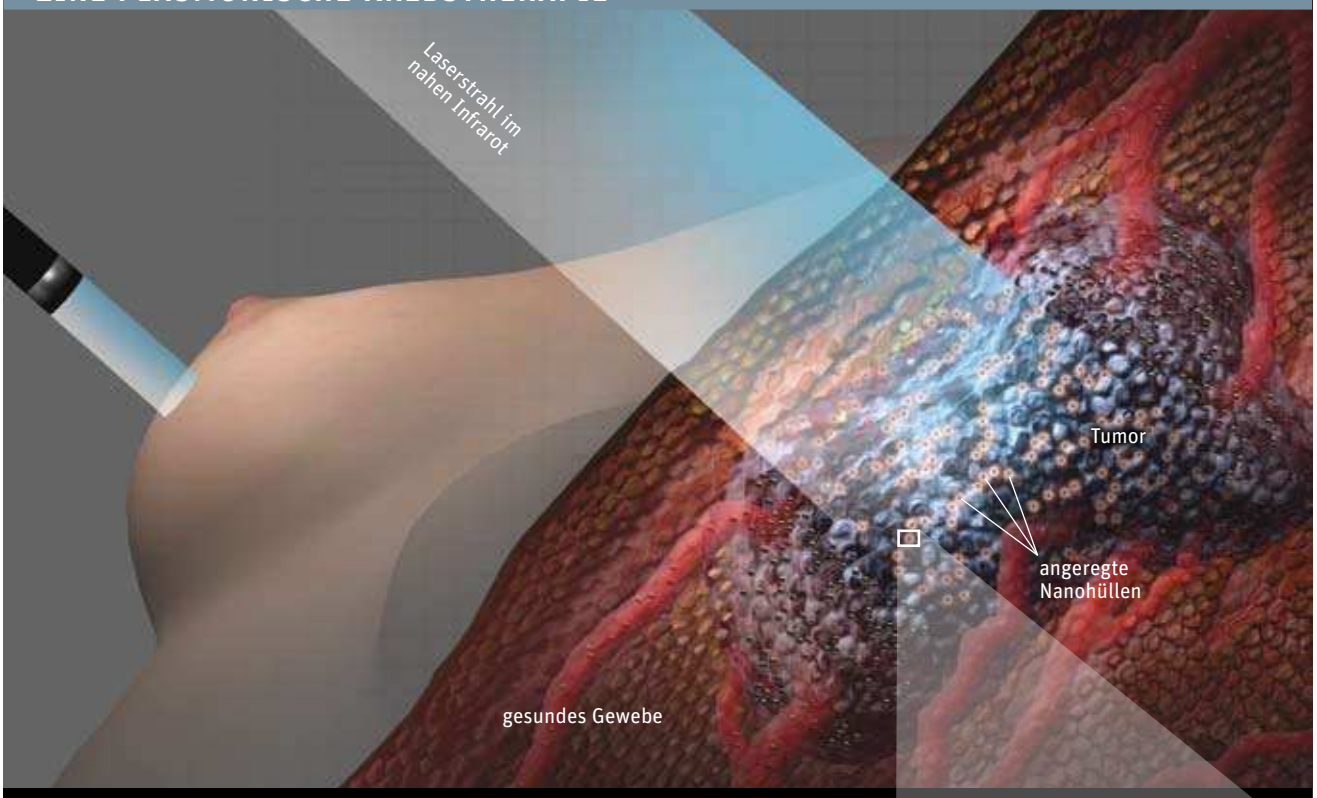
Schlitzwellenleiter könnten große Datenmengen blitzschnell in die logischen Schaltkreise einspeisen und dadurch die Geschwindigkeit von Computerchips deutlich erhöhen. In der Darstellung rechts transportieren relativ große dielektrische Wellenleiter optische Signale in eine Anordnung plasmonischer Schalter – so genannte Plasmonster –, die ihrerseits die Signale auf elektronische Transistoren verteilen. Die Plasmonster bestehen aus Schlitzwellenleitern, die an den breitesten Stellen 100 Nanometer und an den Kreuzungen nur 20 Nanometer dick sind (Detailbild).





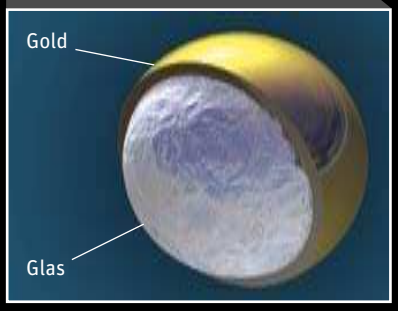
PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

Eine plasmonische Krebstherapie



Eine mögliche Krebsbehandlung zerstört Tumore mit Hilfe plasmonischer Effekte. Der Arzt injiziert Nanohüllen – mit Gold beschichtete Glaspartikel, deren Durchmesser nur 100 Nanometer beträgt (Detailbild) – in den Blutkreislauf. Die Nanohüllen lagern sich bevorzugt in den schnell wachsenden und darum besonders stark durchbluteten Tumoren ab. Wird ein infraroter Laserstrahl auf das Gebiet gerichtet, so durchdringt er die Haut und induziert Resonanzschwingungen der Elektronen in den Nanohüllen. Dadurch werden die Tumorzellen erhitzt und abgetötet, während das gesunde Gewebe der Umgebung nicht geschädigt wird.

Die Nanohüllen können außerdem auch an Antikörper gebunden werden, damit sie gezielt Tumore ansteuern und diese dann durch Erwärmung vernichten.



PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

▷ über die innere Struktur des Probenmaterials gibt. Als Thomas Ebbesen 1989 am Forschungsinstitut der Firma NEC in Japan einen dünnen, mit Millionen mikroskopischer Löcher versehenen Goldfilm beleuchtete, entdeckte er, dass die Folie irgendwie mehr Licht durchließ, als nach Anzahl und Größe der Löcher zu erwarten war. Neun Jahre später zogen Ebbesen und seine Mitarbeiter daraus den Schluss, dass Oberflächenplasmonen auf dem Film die Übertragung der elektromagnetischen Energie intensivierten.

Einen großen Sprung machte die Plasmonik mit der Entdeckung so genannter Metamaterialien, in denen Elektronenschwingungen zu erstaunlichen optischen Eigenschaften führen können (siehe »Die Superlinse« von John B. Pendry und David R. Smith, Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 74). Außerdem kamen dem Fortschritt neue Werkzeuge zu Hilfe: Mit der enormen Rechenkapazität moderner Computer lassen sich die komplizierten elektromagnetischen Felder, die durch plasmonische Effekte entstehen, exakt simulieren, und neue Herstellungsverfahren für Nanostrukturen ermöglichen Bau und Erprobung extrem winziger plasmonischer Bauteile und Schaltkreise.

Auf den ersten Blick scheinen sich Metallstrukturen schlecht für das Übertragen von Lichtsignalen zu eignen, denn Metalle sind für hohe optische Verluste bekannt. Die im elektromagnetischen Feld schwingenden Elektronen kollidieren mit dem umgebenden Atomgitter und verzetteln die Feldenergie rapide. Doch die Plasmonenverluste sind an der Grenze zwischen einem dünnen Metallfilm und einem Dielektrikum geringer als im Innern eines Metalls, weil sich das Feld in das nicht leitende Material ausbreitet – und dort gibt es keine freien Elektronen, die schwingen und durch Kollisionen Energie verschwenden könnten.

Dieser Umstand beschränkt die Plasmonen ganz von selbst auf die an das Dielektrikum angrenzende Metalloberfläche. In einem Sandwich aus Dielektrikum- und Metallschichten pflanzen sich die Oberflächenplasmonen nur in der dünnen Grenzschicht fort (siehe Kasten S. 61, oberes Bild).

Da diese ebenen plasmonischen Strukturen als Wellenleiter wirken – sie führen die elektromagnetischen Wellen an der Metall-Dielektrikum-Grenze entlang –, könnten sie Signale auf einem Chip steuern. Zwar erleidet ein optisches Signal in einem Metall mehr Verluste als in einem Dielektrikum wie Glas, aber ein Plasmon kann in einem metallischen Dünnschichtwellenleiter mehrere Zentimeter weit kommen, bevor es erlischt. Die Weglänge lässt sich maximieren, wenn der Wellenleiter asymmetrisch arbeitet, das heißt einen größeren Teil der elektromagnetischen Energie vom leitenden Metallfilm weg und in das umgebende Dielektrikum hinein verlagert; dadurch sinkt der Verlust. Weil die elektromagnetischen Felder an der Ober- und Unterseite des Metallfilms miteinander wechselwirken, können die Frequenzen und Wellenlängen der Plasmonen durch Variieren der Foliendicke passend eingestellt werden.

In den 1990er Jahren entwickelten Sergey Bozhevolnyi von der Universität Aalborg (Dänemark) und Pierre Berini von der Universität Ottawa (Kanada) ebene plasmonische Bauteile, die vieles vermochten – beispielsweise das Aufspalten geführter Wellen –, was üblicherweise rein dielektrische Komponenten leisten. Diese Strukturen könnten Daten von einem Teil eines Chips zu einem anderen übertragen, aber sie sind zu groß, um Signale durch das nanometerkleine Innere eines Prozessors zu befördern.

Damit Plasmonen durch Drähte im Nanobereich wandern können, müssen kompliziert geformte Wellenleiter die Wellenlänge des Signals senken, indem sie es auf engen Raum zusammenquetschen. Ende der 1990er Jahre versuchten meine Gruppe und ein Team um Joachim Krenn von der Universität Graz (Österreich), solche »Subwellenlängen«-Wellenleiter zu produzieren. Stefan Maier baute mit mir am Caltech eine Struktur aus linearen Ketten von Goldpunkten mit jeweils kaum hundert Nanometer Durchmesser. Ein Lichtstrahl mit 570 Nanometer Wellenlänge löste in den Punkten Resonanzschwingungen aus und erzeugte Oberflächenplasmonen, die an den Ketten entlangwanderten, wobei sie sich auf einen extrem flachen – nur 75 Nanometer hohen – Pfad beschränkten. Die Grazer Gruppe erzielte ähnliche Resultate und bildete die Muster der an den Ketten übertragenen Plasmonen ab. Die Absorptionsverluste dieser Nanodrähte waren allerdings relativ hoch; dadurch erlahmte das Signal schon nach einigen hundert Nanometern oder kam bestenfalls ein paar Mikrometer (tausendstel Millimeter) weit. Somit taugten diese Wellenleiter nur für Verbindungen sehr kurzer Reichweite.

Zum Glück sinken die Absorptionsverluste, wenn man die Plasmonenleiter quasi umstülpt, mit dem Dielektrikum als Kern und dem Metall als Mantel (siehe Kasten S. 61, mittleres Bild). Bei diesem so genannten Plasmonen-Schlitzwellenleiter lässt sich die Wellenlänge der Plasmonen durch Anpassen der Dicke des dielektrischen Kerns verändern. Mein Labor am Caltech und die Gruppe um Mark Brongersma an der Stanford-Universität haben gezeigt, dass Schlitzwellenleiter ein Signal bis zu einigen zehn Mikrometern weit übertragen können. Hideki Miyazaki vom Nationalen Institut für Materialwissenschaft in Japan quetschte rotes Licht, dessen Wellenlänge im Freien 651 Nanometer beträgt, in einen nur drei Nanometer dicken und 55 Nanometer breiten Plasmonen-Schlitzwellenleiter. Die Wellenlänge der Oberflächenplasmonen lag bei 51 Nanometern – knapp acht Prozent des Werts im Freien.

Auf diese Weise vermag die Plasmonik durch Anregung von Materialien mit sichtbarem Licht Signale im Bereich weicher Röntgenstrahlung – zehn bis hundert Nanometer – zu erzeugen. Die Wellenlänge kann gegenüber ihrem Wert im Freien um mehr als das Zehnfache reduziert werden, und dennoch bleibt die Signalfrequenz gleich. Dieser erstaunliche Effekt ermöglicht plasmonische Strukturen im Nanometerbereich, die rein elektronische Schaltkreise aus Drähten und Transistoren ersetzen könnten.

Derzeit werden die Schaltkreismuster mittels Lithografie auf Siliziumchips gedruckt; ein ganz ähnliches Verfahren könnte zur Massenproduktion winziger plasmonischer Bauteile mit engen dielektrischen Streifen und Lücken führen. Solche Anordnungen würden die Wellen positiver und negativer Ladung auf der Metalloberfläche entlangführen; die wechselnden Ladungsdichten würden dem Wechselstrom in einem gewöhnlichen Draht entsprechen. Doch da optische Signale viel höhere Frequenzen haben als elektrische – mehr als 400 000 Gigahertz (Milliarden Hertz) gegenüber 60 Hertz –, vermag der plasmonische Schaltkreis viel mehr Daten zu übertragen. Außerdem wandert die elektrische Ladung nicht von einem Ende des plasmonischen Schaltkreises zum anderen; die Elektronen strömen nicht in eine Richtung, sondern verdichten und verdünnen sich an Ort und Stelle. Darum ist das Gerät nicht den Widerstands- und Kapazitätseffekten ausgesetzt, welche die Datenübertragung in integrierten Schaltkreisen mit elektrischen Interconnects einschränken.

»Plasmonster«-Schalter könnten in zehn bis zwanzig Jahren die Computertechnik revolutionieren

Plasmonische Schaltkreise wären sogar noch schneller und nützlicher, wenn es gelänge, einen »Plasmonster«-Schalter zu bauen – ein Gerät mit drei Anschlüssen und ähnlichen Eigenschaften wie ein Transistor. Mein Caltech-Labor und andere Forschergruppen haben kürzlich leistungsschwache Prototypen eines solchen Schalters entwickelt. Plasmonster mit besserem Leistungsprofil könnten als Kernstück eines ultraschnellen Signalverarbeitungssystems dienen; dieser Fortschritt würde in zehn bis zwanzig Jahren die Computertechnik revolutionieren.

Nanohüllen und Zaubermäntel

Doch die Anwendungsmöglichkeiten gehen weit über Computer hinaus. Naomi Halas und Peter Nordlander von der Rice-Universität in Houston (Texas) haben so genannte Nanohüllen entwickelt, bestehend aus einer rund zehn Nanometer dicken Goldschicht, welche die gesamte Oberfläche eines rund hundert Nanometer großen Glasstückchens bedeckt. Externe elektromagnetische Wellen erzeugen in der Goldhülle Elektronenschwingungen. Wegen der Wechselwirkung zwischen den Feldern auf der Innen- und Außenseite der Hülle hängt die Wellenlänge, bei der das Gebilde durch Resonanz Energie absorbiert, von der Größe des Glaspartikels und der Di- ▷

▷ cke der Goldhülle ab. Darum können Forscher gezielt Nanohüllen konstruieren, die nur bestimmte Wellenlängen absorbieren – etwa kurzwelliges Licht mit wenigen hundert Nanometern am blauen Ende des optischen Spektrums oder Licht im nahen Infrarotbereich mit fast zehn Mikrometer Wellenlänge.

Damit werden Nanohüllen ein viel versprechendes Werkzeug für die Krebsbehandlung. 2004 injizierten Naomi Halas und ihre Kollegin Jennifer West plasmonische Nanohüllen in den Blutkreislauf von krebskranken Mäusen. Die Partikel erwiesen sich nicht nur als unschädlich, sondern lagerten sich bevorzugt im Tumorgewebe an, weil schnell wachsende Geschwülste besonders gut durchblutet werden. Außerdem können die Nanohüllen auch an Antikörper gebunden werden, damit sie gezielt Tumore ansteuern. Glücklicherweise sind menschliche und tierische Gewebe transparent für Strahlung bei bestimmten Infrarot-Wellenlängen. Als die Forscherinnen Laserstrahlen im nahen Infrarot durch die Haut der Mäuse auf die Tumore richteten, erhöhte sich durch Resonanzabsorption in den eingebetteten Nanohüllen die Temperatur des Krebsgewebes von rund 37 auf 45 Grad Celsius.

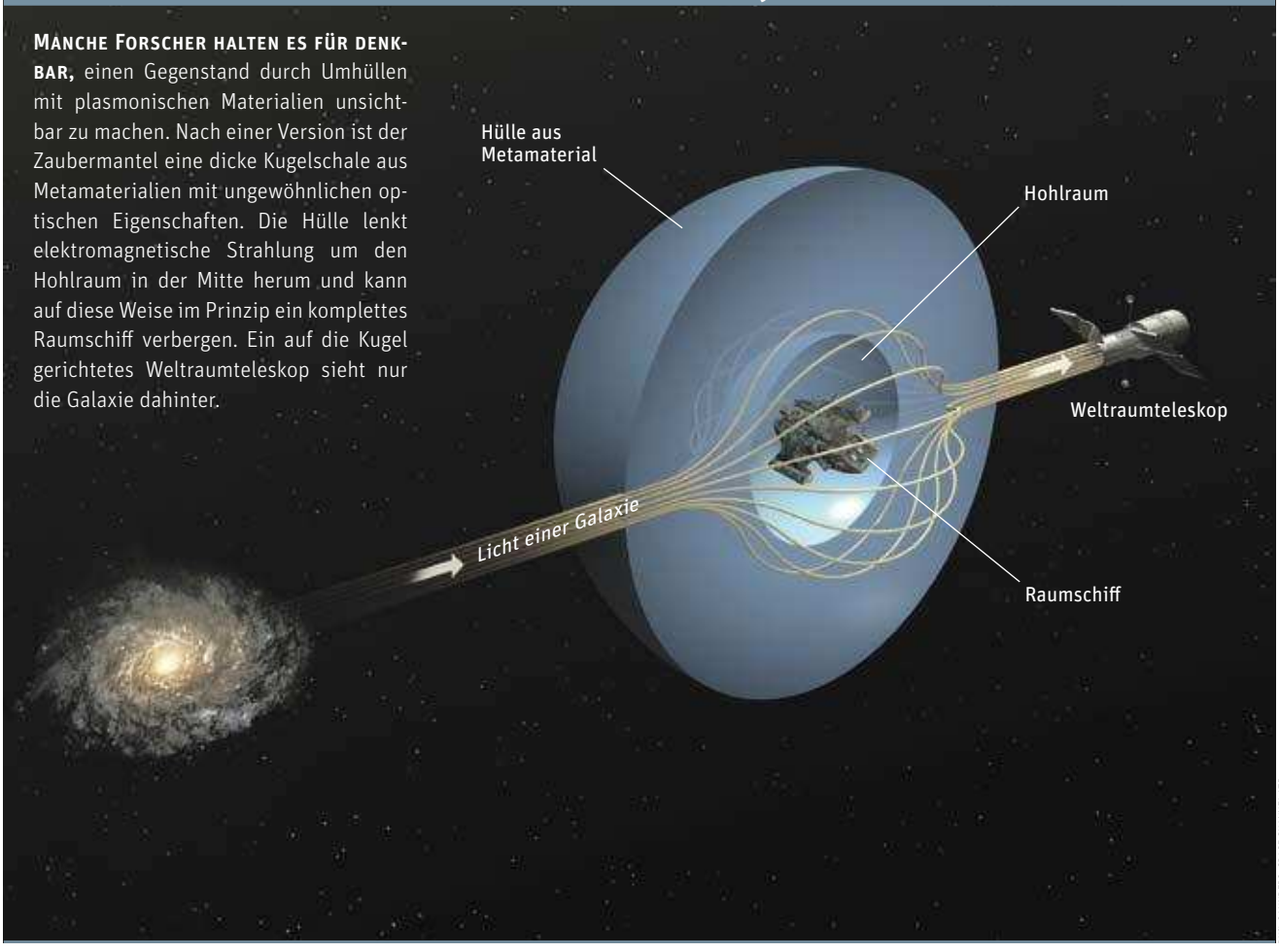
Schonende Krebsbehandlung

Das photothermale Aufheizen tötete die Krebszellen ab, ohne das umgebende gesunde Gewebe zu schädigen. Bei den mit Nanohüllen behandelten Mäusen verschwanden binnen zehn Tagen alle Anzeichen von Krebs, während bei der unbehandelten Kontrollgruppe die Tumore rasch weiterwuchsen. Die Firma Nanospectra Biosciences in Houston (Texas) sucht derzeit bei der amerikanischen Arzneimittelzulassungsbehörde *(Food and Drug Administration)* um Genehmigung für die klinische Erprobung der Nanohüllentherapie bei Patienten mit Krebs im Kopf- und Halsbereich an.

Vielleicht wird bald auch die Beleuchtungsindustrie LEDs anbieten, die plasmonische Materialien enthalten und so hell strahlen, dass sie der Glühbirne Konkurrenz machen. Wie Forscher schon seit den 1980er Jahren wissen, erhöht sich durch plasmonische Verstärkung des elektrischen Felds an der Metall-Dielektrikum-Grenze die Emissionsrate von lumineszenten Farbstoffen, wenn sie nahe der Metalloberfläche platziert werden. Seit Kurzem ist auch bekannt, dass diese Feldverstärkung die Emissionsrate von Quantenpunkten und Quantentrögen – winzigen Halbleiterstrukturen, die Licht absorbieren und emittieren – dramatisch zu steigern vermag, und damit die Effizienz und Helligkeit von Festkörper-LEDs. Wie mein Caltech-Kollege Axel Scherer 2004 zusammen mit Mitarbeitern der japanischen Firma Nichia zeigte, erhöht sich die Intensität des von einer Galliumnitrid-LED emittierten Lichts um das Vierzehnfache, wenn die Oberfläche dicht mit plasmonischen Nanopartikeln aus Silber, Gold oder Aluminium bedeckt wird.

Zukunftsmusik: Ein Zaubermantel macht Objekte unsichtbar

Manche Forscher halten es für denkbar, einen Gegenstand durch Umhüllen mit plasmonischen Materialien unsichtbar zu machen. Nach einer Version ist der Zaubermantel eine dicke Kugelschale aus Metamaterialien mit ungewöhnlichen optischen Eigenschaften. Die Hülle lenkt elektromagnetische Strahlung um den Hohlraum in der Mitte herum und kann auf diese Weise im Prinzip ein komplettes Raumschiff verbergen. Ein auf die Kugel gerichtetes Weltraumteleskop sieht nur die Galaxie dahinter.



PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

Außerdem lassen sich mit plasmonischen Nanopartikeln vielleicht LEDs auf Siliziumbasis entwickeln. Solche Geräte wären viel billiger als herkömmliche LEDs aus Galliumnitrid oder Galliumarsenid, sind aber derzeit wegen ihrer niedrigen Lichtemissionsraten noch nicht konkurrenzfähig (siehe »Laser aus Silizium« von Bahram Jalali, Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 76). Meine Gruppe am Caltech hat in Zusammenarbeit mit einem Team um Albert Polman vom FOM-Institut für Atom- und Molekülphysik in Amsterdam gezeigt, dass plasmonische Nanostrukturen aus Silber oder Gold in Verbindung mit Silizium-Quantenpunkten ihre Lichtemission verzehnfachen. Zudem kann die Frequenz der verstärkten Emissionen durch Variieren der Nanopartikelgröße passend eingestellt werden. Nach unseren Berechnungen lässt sich die Strahlungsrate durch sorgfältiges Abstimmen der plasmonischen Resonanzfrequenz sowie durch genaue Kontrolle des Abstands zwischen Metallpartikeln und Halbleitermaterial auf das gut Hundertfache erhöhen. Dann würden Silizium-LEDs genauso hell strahlen wie herkömmliche Geräte.

Sogar an einem plasmonischen Gegenstück zum Laser wird bereits gearbeitet. Mark Stockman von der Georgia State University in Atlanta und David Bergman von der Universität Tel Aviv (Israel) haben die Physik eines solchen Apparats beschrieben und ihn Spaser genannt, als Abkürzung für *surface plasmon amplification of stimulated emission of radiation*. Obgleich der Spaser bislang nur in der Theorie existiert, haben die Forscher seine Herstellung aus Halbleiter-Quantenpunkten und Metallpartikeln skizziert. Die von den Quantenpunkten gelieferte Strahlungsenergie würde in Plasmonen umgewandelt und diese würden anschließend in einem plasmonischen Resonator verstärkt. Da die von einem Spaser erzeugten Plasmonen viel enger lokalisiert wären als ein üblicher Laserstrahl, könnte das Gerät bei sehr geringer Leistung funktionieren und sehr kleine Objekte selektiv anregen. Mit Spasern würde die Spektroskopie so empfindlich, dass Detektoren winzige Mengen gefährlicher Chemikalien oder Viren identifizieren könnten.

Die wohl faszinierendste Anwendung der Plasmonik wäre die Erfindung eines unsichtbar machenden Mantels. 1897 veröffentlichte H. G. Wells die Erzählung »The Invisible Man«: Ein junger Wissenschaftler entdeckt, wie er die Brechzahl seines eigenen Körpers der von Luft angleichen kann, und wird dadurch unsichtbar. Durch Anregen einer plasmonischen Struktur mit Strahlung, deren Frequenz ziemlich genau der Resonanzfrequenz der Struktur entspricht, kann ihre Brechzahl tatsächlich an die von Luft angeglichen werden – das heißt, sie würde Licht weder brechen noch reflektieren. Die Struktur würde zwar Licht absorbieren, doch bei Beschichtung mit einem optisch aktiven Material, welches das übertragene Signal gerade so verstärkt wie der Resonator in einem Spaser, könnte der Zuwachs an Intensität die Absorptionsverluste kompensieren. Die Struktur würde unsichtbar – zumindest für Strahlung eines bestimmten Frequenzbereichs.

Ein wirklich unsichtbar machender Mantel muss freilich alles innerhalb der Struktur verbergen und bei allen optischen Frequenzen funktionieren. Das wäre gewiss noch schwieriger, aber manche Physiker halten es für möglich. Wie John B. Pendry vom Imperial College London und seine Mitarbeiter 2006 zeigten, könnte eine Hülle aus Metamaterialien theoretisch die eindringenden elektromagnetischen Wellen so ablenken, dass sie eine kugelförmige Region im Innern aussparen (siehe Kasten auf der Seite gegenüber).

Obwohl der »unsichtbare Mann« vermutlich eine fantastische Geschichte von H. G. Wells bleiben wird, illustrieren solche Ideen den Reichtum an optischen Eigenschaften, den die Plasmonik verspricht. Das komplizierte Wechselspiel zwischen elektromagnetischen Wellen und freien Elektronen hat Forschern neue Möglichkeiten eröffnet, Daten in integrierten Schaltkreisen zu übertragen, Wohnungen zu beleuchten und Krebs zu bekämpfen. Aus den faszinierenden plasmonischen Phänomenen werden wohl noch erstaunlichere Entdeckungen und Erfindungen hervorgehen. ◁

Der Lykurgos-Becher, ein römischer Kelch aus dem 4. Jahrhundert, wechselt die Farbe durch plasmonische Anregung der im Glas eingelagerten Metallpartikel. Wird das normalerweise grünliche Gefäß von innen erleuchtet, erscheint es rot.

BRIDGEMAN ART LIBRARY / BRITISH MUSEUM LONDON

Harry A. Atwater ist Professor für Angewandte Physik und Materialwissenschaft am California Institute of Technology in Pasadena. Neben plasmonischen Nanostrukturen erforscht sein Team neue Materialien für Solaranlagen sowie die Erzeugung chemischer Treibstoffe mit Sonnenenergie.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Plasmonics: Fundamentals and applications. Von Stefan A. Maier. Springer, 2007

Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. Von Ekmel Ozbay in: Science, Bd. 311, S. 189, 2006

Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures. Von Stefan A. Maier und Harry A. Atwater in: Journal of Applied Physics, Bd. 98, Artikel Nr. 011101, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872681

Der südliche Abschnitt des Mississippi (blau) fließt durch eine zungenförmige Senke (purpurfarben), die das Ouachita-Gebirge im Westen von den Appalachen im Osten trennt. Sie verdankt ihre Existenz der Wanderung Nordamerikas über einen so genannten Hotspot: eine intensive Wärmequelle, die tief im Erdmantel – vermutlich dicht über dem Erdkern – gelegen ist.

NASA / VISIBLE EARTH

Die merkwürdige Geschichte des Mississippi

Ein heißer Fleck im Erdmantel, der heute unter den Bermuda-Inseln liegt, veranstaltete eine Berg- und Talfahrt mit dem Mississippi-Tiefland, als Nordamerika über ihn hinwegdriftete. Erst danach war der Weg frei für den »Old Man River«.

Von Roy B. Van Arsdale
und Randel T. Cox

Ein Blick auf die Weltkarte zeigt, dass sich die Kontinente rings um den Atlantik wie die Teile eines riesigen Puzzles fast nahtlos aneinanderfügen lassen. Zum Beispiel passt Westafrika an die Ostküste der USA und der Norden Südamerikas an den Rand des Golfs von Mexiko. Tatsächlich war dies die Anordnung vor einigen hundert Millionen Jahren. Das wissen die Geologen unter anderem deshalb, weil die plattentektonischen Bewegungen, die damals zur Vereinigung mehrerer Kontinente geführt hatten, Spuren hinterlassen haben, die noch heute erkennbar sind.

So wurden im Osten der USA beim Zusammenstoß mit Afrika die Appalachen aufgeschoben und erreichten damals wohl etwa die Höhe der heutigen Rocky Mountains. Auf ähnliche Weise entstand durch die Kollision Südamerikas mit der Golfküste das Ouachita-Gebirge, das in West-Ost-Richtung durch Arkansas verläuft und sich früher nahtlos bis in die südlichen Appalachen fortsetzte. Irgendwann jedoch wurde die einst zusammenhängende Ouachita-Appalachen-Kette zweigeteilt und so Platz für den Mississippi geschaffen, der von nun an nach Süden in den Golf von Mexiko fließen konnte.

In den vergangenen zehn Jahren suchten wir beide nach dem Grund für diese Aufspaltung. Was wir als Erklärung fanden, löst auch einige andere Rätsel der Geologie Nordamerikas. So beantwortet es die Frage, warum in Arkansas Diamanten vorkommen und wieso die stärksten Erdbeben, die jemals in den Festlandstaaten der USA registriert wurden, nicht in Kalifornien oder Washington auftraten, sondern ausgerechnet in Missouri.

Die Kerbe, die heute das Ouachita-Gebirge von den Appalachen trennt, ist im deutschen Sprachraum als Mississippi-Tiefland bekannt. Englisch heißt sie dagegen präziser »Mississippi Embayment«, also Mississippi-Einbuchtung. Obwohl es sich um eine der größten Geländeformen der zentralen USA handelt, gab es dafür bisher keine überzeugende Erklärung.

Wandernde Kontinente

Unter der riesigen, zungenförmigen Niederung liegen mächtige Sand-, Schluff- und Tonschichten, die vor langer Zeit in einer Meeresbucht des Golfs von Mexiko abgelagert wurden. Dieser überflutete die Region vor etwa 85 Millionen Jahren – in der Oberkreide, als noch Saurier auf der Erde lebten – und zog sich einige 10 Millionen Jahre später wieder zurück.

Daraus könnte man den naheliegenden Schluss ziehen, die Ablagerungen seien die Hinterlassenschaft eines Flachmeers, das sich beim Vorstoß des Golfs in eine kontinentale Tiefebene bildete. Allerdings befindet sich die Basis der Sedimentschicht, wie schon eine ganze Weile bekannt ist, erstaunliche 2600 Meter unter dem derzeitigen Meeresspiegel. Demnach muss dieser Teil des Kontinents ganz erheblich abgesunken sein. Warum?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir weit in die Vergangenheit zurückgehen, als noch Trilobiten die Meere bevölkerten. Während großer Teile des Paläozoikums – vor 545 bis 245 Millionen Jahren – umschloss ein Ozean die Region der heutigen USA. Doch vor 300 Millionen Jahren – gerade erschienen die ersten Reptilien – vereinigten sich die Landmassen, die später zu Nordamerika, Südamerika, Afrika und Europa werden sollten, zu einem Superkontinent namens Pangaea. Bei ihrem Zusammenstoß falteten sie in den Knautschzonen an ihren Rändern etliche Gebirge auf.

Dazu gehörte auch die Ouachita-Appalachen-Kette. Von Ost nach West verlaufend, teilte sie innerhalb der nächsten rund 70 Millionen Jahre das Innere einer riesigen Landmasse. Dabei wirkte sie zugleich als Wasserscheide: Flüsse, die dort entsprangen, strömten entweder nach Süden zum späteren südamerikanischen Kontinent hin oder nach Norden ins heutige Nordamerika.

Vor etwa 230 Millionen Jahren – mittlerweile stapften die ersten Dinosaurier über die Erde – begann Pangaea zu zerbrechen. Es überrascht kaum, dass der Superkontinent fast genau dort zerriss, wo er zuvor zusammengefügt worden war: dicht neben der Ouachita-Appalachen-Kette. Im Verlauf dieser Öffnung entstanden der Atlantik und der Golf von Mexiko. Der Atlantik verbreitert sich bis heute, während der Golf vor etwa 145 Millionen Jahren, als sich die ersten Vögel in die Lüfte erhoben, seine Ausdehnung stoppte.

Dutzende von Jahrmillionen lang bildete das Ouachita-Appalachen-Gebirge als durchgehende Kette die Nordgrenze des Golfs von Mexiko. Dadurch konnte kein Wasser vom Zentrum des Kontinents nach Süden zur Karibik hin abfließen. Das belegen auch geologische Befunde im Golf von Mexiko. An seinem Nordrand bildeten Korallenriffe während dieses langen Zeitraums einen Wall. Aus ihm gingen später die mächtigen, Erdöl führenden Kalkschichten hervor, die Geologen überall unter dem Meeresboden zwischen Florida und Nordmexiko nachgewiesen haben. Korallen sterben ab, wenn sie mit Schluff und Ton zugeschüttet werden. Deshalb kann damals kein größerer Fluss wie der Mississippi seine Fracht im nördlichen Golf von Mexiko abgeladen haben.

All die Zeit hindurch blieb die Golfküste relativ stabil: Weder wurde sie auseinandergerissen noch von anderen Kon-

In Kürze

▶ Das Ouachita-Gebirge in Arkansas und Oklahoma war einst mit dem Südausläufer der Appalachen verbunden. Beide Erhebungen bildeten **eine zusammenhängende Barriere**, sodass Flüsse im Innern des Kontinents nur in nördlicher oder westlicher Richtung das Meer erreichen konnten.

▶ In der mittleren Kreidezeit wanderte Nordamerika über einen **heißen Fleck** (Hotspot) im Erdmantel, der sich vorübergehend verstärkte und dadurch den östlichen Abschnitt des Ouachita-Gebirges anhob. Dabei entstand eine **Aufwölbung**, die in den folgenden Jahrmillionen durch Erosion wieder eingeebnet wurde.

▶ Als sich die Region vom Hotspot entfernte, senkte sich die abkühlende Kruste und bildete **eine große, zungenförmige Mulde**. Diese wurde zunächst überflutet und dann mit marinen Sedimenten gefüllt. So entstand das Tiefland, durch das heute der Mississippi in südlicher Richtung zum Golf mäandriert.

tinenten gerammt. Doch vor etwa 95 Millionen Jahren endete die Ruhephase. Während der nächsten 10 Millionen Jahre wölbte sich die Kruste großräumig auf: Ein Gebiet, das sich vom Süden Louisianas nach Norden bis in den Südosten Missouris und vom heutigen Tennessee River nach Westen bis Little Rock (Arkansas) erstreckte, wurde angehoben. Die betroffene Region entsprach damit genau den Umrissen des heutigen Mississippi-Tieflands.

Eine seltsame Folge von Hebung, Abtragung und Senkung

Bei der Hebung entstand ein breiter, nach Nordosten gerichteter Gebirgsrücken, der die beeindruckende Höhe von 2000 bis 3000 Metern erreichte. (Zum Vergleich: Das Tibetplateau liegt etwa 5000 Meter über dem Meeresspiegel.) Es gibt mehrere indirekte Belege für die Existenz dieser riesigen Aufwölbung. Dazu gehören vor allem Schotter an verschiedenen Stellen am Ostrand des heutigen Mississippi-Tieflands. Wasserreiche Flüsse, die in dem damals neu entstandenen Bergrücken entsprangen, nahmen die Kieselsteine, wie detaillierte Untersuchungen ergaben, mit auf ihrem Weg nach Osten.

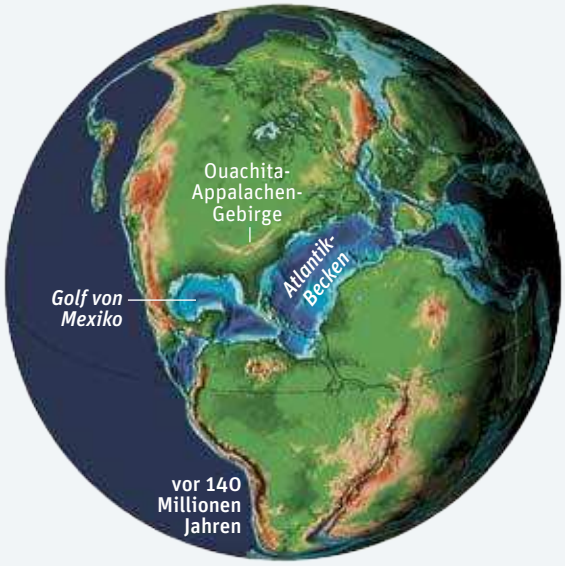
Noch zwingendere Belege für eine weiträumige Hebung liefert das, was im Untergrund des Mississippi-Tieflands fehlt: Sedimente aus der Zeit vor der Oberkreide, die bis zu 3000 Meter mächtig sein sollten. Offenbar wurden sie abgetragen, als sich die Region während der fraglichen 10 Millionen Jahre weit über den Meeresspiegel hob. Das ist nicht weiter verwunderlich, denn die allgegenwärtigen Kräfte der Verwitterung und Erosion ebnen im Lauf der Zeit selbst die höchsten Erhebungen ein.

Nach der Entstehung des Gebirgsrückens und seiner Abtragung geschah noch Erstaunlicheres: Die Region sank plötzlich ab. Geologischen Untersuchungen zufolge bewegte sich das Gebiet, das sich zuvor um 2000 bis 3000 Meter gehoben hatte und nach der Einebnung nur noch wenig über Meeresspiegel lag, nun um etwa den gleichen Betrag abwärts. Im Zeitraum vor 85 bis 24 Millionen Jahren wurde aus dem ehemaligen Kamm eines hohen Gebirges folglich eine ebenso tiefe Senke, in die Meerwasser eindrang. Mit der Zeit lagerten sich 2600 Meter mächtige marine Sedimente darin ab. ▷

Schnappschüsse aus der Vergangenheit

Plattentektonische Rekonstruktionen machen die Entwicklung der Gebirgsbarriere deutlich, die lange Zeit Flüsse im Zentrum Nordamerikas daran hinderte, wie der heutige Mississippi in südlicher Richtung zum Golf zu strömen.

Vor etwa 200 Millionen Jahren (oben) stießen die damaligen Landmassen zusammen und bildeten einen riesigen Superkontinent namens Pangaea. An den Kollisionsstellen wurden durch Knautschprozesse Gebirgsketten aufgeschoben. Eine davon zog sich am Süd- und Ostrand der Nordamerikanischen Platte entlang. Flüsse im Zentrum dieser Platte mussten auf dem Weg zum Meer deshalb nach Norden oder Westen ausweichen.



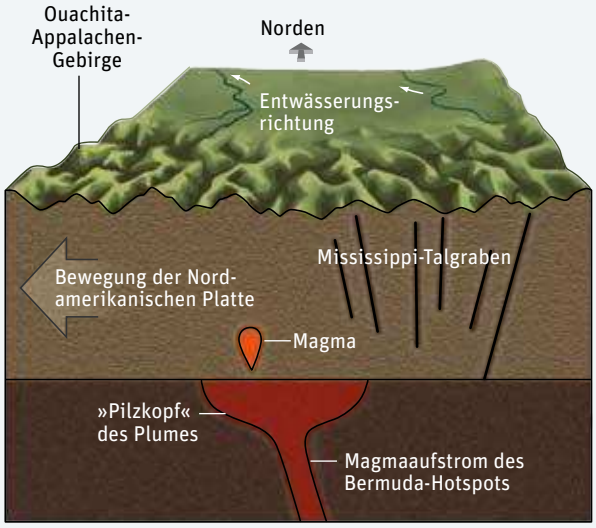
Das Ouachita-Appalachen-Gebirge blieb auch dann noch eine zusammenhängende Barriere, als die Yucatán-Platte Richtung Süden abdriftete und die Afrikanische Platte sich von Nordamerika trennte. Dadurch entstanden in der Unterkreide – vor etwa 140 Millionen Jahren – der Golf von Mexiko und ein großer Teil des heutigen Atlantikbeckens (Mitte).

Erst in der Oberkreide – vor etwa 80 Millionen Jahren – teilte eine großräumige Mulde die Ouachita-Appalachen-Kette nördlich des Golfs von Mexiko. Da der Meeresspiegel damals weltweit sehr hoch lag, überfluteten die Ozeane überall auf der Erde tief liegende kontinentale Bereiche. Und so füllte sich auch die neu entstandene Senke mit Wasser (unten).

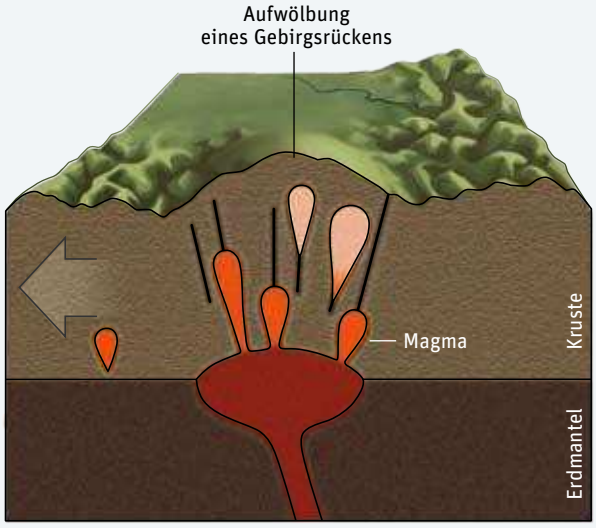
DIESE SEITE: CHRISTOPHER R. SCOTESE, PALEOMAP PROJECT

Wie eine Gebirgskette sich teilte

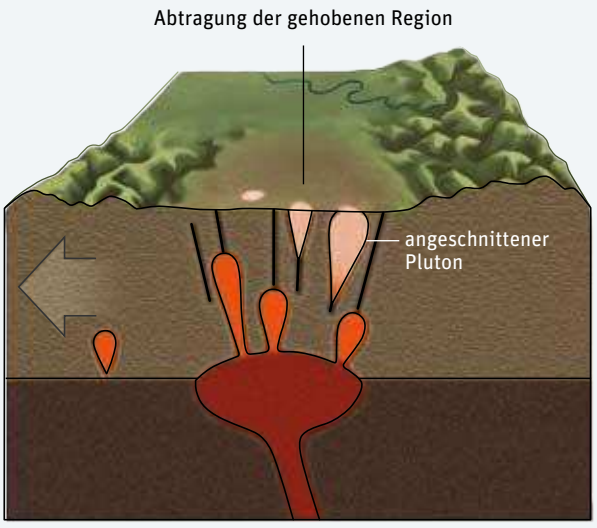
Die Bildung des Mississippi-Tieflands begann paradoxerweise mit der Anhebung der betreffenden Krustenregion. Verantwortlich dafür wie für die nachfolgende Absenkung war die Passage eines Hotspots, der sich just zu der Zeit intensivierte.



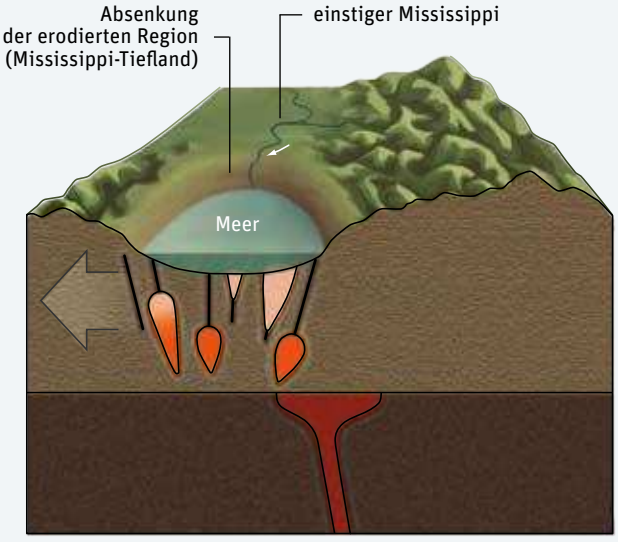
1 In der Unterkreide befand sich die vom Bermuda-Hotspot ausgehende Zone heißen, aufdringenden Gesteins – ein so genannter Plume – noch ein gutes Stück westlich des Mississippi-Talgrabens, der von alten, steilen Brüchen durchzogen ist. Die hohe Ouachita-Appalachen-Kette zwang die Flüsse im Innern des Kontinents, in nördlicher oder westlicher Richtung zum Meer zu strömen.



2 Durch plattentektonische Bewegungen gelangte der Mississippi-Talgraben in der Mittleren Kreide, als die Aktivität solcher Wärmequellen tief im Erdmantel weltweit zunahm, über den Bermuda-Hotspot. An den Brüchen entlang drang Magma nach oben und lieferte zusätzliches Gesteinsmaterial; zugleich dehnte sich der obere Teil der Platte auf Grund der Erwärmung aus. So entstand ein breiter Gebirgsrücken.



3 Durch Verwitterung erodierte das zuvor angehobene Gebiet. Dabei wurden auch die Spitzen einiger magmatischer »Plutone« gekappt. Diese kristallinen Gesteinskörper waren entstanden, als Magma aus großen Tiefen an Brüchen entlang emporstieg, sich abkühlte und erstarrte, bevor es die Oberfläche erreichte. Ihre fehlenden Spitzen beweisen, dass danach Erosion stattgefunden hat.



INFOGRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN

4 In der Oberkreide, als sich der Mississippi-Talgraben vom Bermuda-Hotspot entfernt hatte, kühlte die gehobene Region ab und senkte sich, wodurch das Meer, dessen Spiegel damals recht hoch stand, das Gebiet überflutete. Flüsse aus dem Innern des Kontinents – darunter der damalige Mississippi – konnten nun nach Süden in die neue Bucht strömen, die sich allmählich mit Sediment füllte.

Wieso bewegte sich innerhalb von nur 70 Millionen Jahren – einer für geologische Verhältnisse recht kurzen Zeit – ein großer Bereich der Erdkruste wie ein Fahrstuhl auf und ab? Auch uns war das zunächst ein Rätsel. Doch nach und nach fanden wir die Mosaiksteine, die sich zur Antwort fügten.

Demnach wanderte die Gegend über einen so genannten Hotspot. Das ist eine außergewöhnlich heiße Zone an oder dicht über der Basis des fast dreitausend Kilometer dicken Erdmantels, der zwischen Kruste und Kern liegt. Über solchen Wärmequellen steigt erhitztes Gesteinsmaterial auf. An der Erdkruste angelangt, beult es diese aus und schmilzt sie stellenweise auf.

Hotspots sind in der Tiefe quasi ortsfest. Wenn nun eine Platte darüber hinwegwandert, entsteht an der Oberfläche oft eine charakteristische geradlinige Spur von Vulkanen. Diese können wie bei der Inselkette von Hawaii in gewissen Abständen aufgereiht sein oder sich überlappen und eine zusammenhängende Bergkette bilden.

Wir kamen auf die Idee, dass ein heißer Fleck im Erdmantel die entscheidende Rolle bei der Entstehung des Mississippi-Tieflands gespielt haben könnte, als wir Modelle für die Bewegungen der Nordamerikanischen Platte betrachteten. Demnach wanderten das Zentrum und der Südosten der Vereinigten Staaten einst über den so genannten Bermuda-Hotspot, der später die vulkanische Struktur schuf, auf der die Bermuda-Inseln sitzen. Diese Wanderung fand genau zu der Zeit statt, als sich der Bereich des heutigen Mississippi-Tieflands hob. Sie könnte den Anstieg gut erklären; denn empordringendes heißes Magma sollte die Kruste aufwölben, indem es dafür sorgt, dass sich das Gestein thermisch ausdehnt und einen Auftrieb erfährt.

Warum in Arkansas Diamanten vorkommen

Tatsächlich gibt es direkte Belege für einstigen Hotspot-Vulkanismus im Mississippi-Tiefland. Dazu zählen so genannte Kimberlitschlote, in denen Diamanten gefunden wurden. (Wer sein Glück probieren möchte, kann den »Crater of Diamonds State Park« in der Nähe von Hot Springs in Arkansas besuchen.) Auch an vielen anderen Stellen, die einst über den Bermuda-Hotspot wanderten, sind die normalen Sedimente mit Gestein magmatischen Ursprungs durchsetzt. Dieses hat im Zentrum von Kansas ein Alter von 115 Millionen und in der Mitte von Mississippi eines von 70 Millionen Jahren. Beide Werte passen gut zur Ost-West-Wanderung Nordamerikas über den Hotspot.

Aber nicht nur die Hebung, sondern auch die spätere Absenkung des heutigen Mississippi-Tieflands lässt sich mit dem heißen Fleck erklären. Durch die Hebung entstand ein hoher Gebirgsrücken, dessen Kamm ungefähr dem Verlauf des heutigen Mississippi folgte. Innerhalb von 10 Millionen Jahren ebneten Verwitterung und Erosion dieses Hochland jedoch wieder ein. Als sich das Gebiet dann vom Bermuda-Hotspot entfernte, kühlte sich die Kruste ab, schrumpfte und sank dadurch bis 2600 Meter unter den Meeresspiegel.

Ein derart tiefes Absacken mag überraschen. Bedenken Sie jedoch, dass das Gebiet um ungefähr zwei- bis dreitausend Meter über den Meeresspiegel angestiegen und dann durch Erosion allmählich abgetragen worden war. Deshalb kehrte es, nachdem die Kruste sich abgekühlt und wieder abgesenkt hatte, nicht in seine ursprüngliche Position zurück; immerhin fehlten inzwischen 2000 bis 3000 Meter Gestein an der Spitze. Vielmehr bildete sich ein tiefer Trog, den der Golf von Mexiko überflutete.

Ein genauerer Blick auf die diamantführenden Gesteine in Arkansas bestätigt dieses Bild. Charakteristisch für solche Gesteine ist, dass ihre Ursprungsmagmen aus dem Mantel in die obere Kruste aufgestiegen und etwa einen Kilometer unter der Oberfläche erstarrt sind. Geologischen Untersuchungen zufolge lagen sie entlang der Achse des Mississippi-Tieflands jedoch – offensichtlich auf Grund von Erosionsprozessen – frei zu Tage, bevor sie unter Ablagerungen aus der späten Kreidezeit begraben wurden. Genau das ist zu erwarten, wenn die Kruste parallel zum Eindringen von Magma zunächst gehoben und dann abgetragen wurde, bevor sie schließlich unter den Meeresspiegel absank und marine Sedimente sich darauf ablagerten.

Zwei Aspekte unserer Rekonstruktion erscheinen zunächst problematisch. Erstens verlief der Bergrücken, der einst im Mississippi-Tiefland aufragte, von Südwest nach Nordost, also fast senkrecht zur »Zugbahn« des Bermuda-Hotspots. Wenn er von dem heißen Fleck ▷

Ein starker Jahrgang ...

... ist die CD-ROM 2006 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Wissen aus erster Hand

Spuren von Hotspots in Nordamerika

Als Nordamerika über den Bermuda- und Great-Meteor-Hotspot hinwegwanderte, hinterließen diese tief im Erdmantel sitzenden Wärmequellen jeweils eine Zugspur an der Oberfläche des Kontinents (orangefarbene Linien). Von den heißen Flecken aufsteigendes Magma beeinflusste die darüber gleitende Platte auf verschiedene Weise.

So schuf der Bermuda-Hotspot das Mississippi-Tiefland. Dessen weite Ausbuchtung nach Nordosten resultiert daher, dass das Magma längs schon vorhandener Brüche (gelbe Linien) emporddrang. Das ist auch der Grund für die längliche Form der Bermudaschwelle, die sich am Meeresboden von Nordosten nach Südwesten erstreckt. Im Nordatlantik entstanden bei der Plattendrift über den Great-Meteor-Hotspot die Neuengland-Seeberge.

Durch die Passage Nordamerikas über die beiden heißen Flecken wurden außerdem alte Grabenbrüche im Innern des Kontinents reaktiviert: das Zentrale Nordamerikanische, das Mississippi-Tal- und das Sankt-Lorenz-Riftsystem. Dadurch kam es sogar in jüngster Vergangenheit noch zu starken Erdbeben bei Manhatten (Kansas), in New Madrid (Missouri), in Charleston (South Carolina) und im Bereich des Sankt-Lorenz-Stroms in Kanada.

▷ geschaffen wurde, fragt sich, warum er nicht vielmehr parallel zu dessen Spur ausgerichtet war.

Diese Abweichung ist jedoch nicht so heikel, wie sie auf den ersten Blick anmutet. Nahe der heutigen Position des Bermuda-Hotspots befindet sich am Meeresboden die Bermudaschwelle. Auch diese längliche Erhebung ist annähernd rechtwinklig zur Spur des heißen Flecks orientiert. Die gängige Erklärung dafür beruht darauf, dass der Meeresboden in diesem Gebiet von einer steil einfallenden Schar von Störungen durchzogen ist, welche die gesamte Kruste zerschneiden und gleichfalls in Nordost-Südwest-Richtung verlaufen.

Das Magma, das die Schwelle bildete, folgte beim Aufdringen vermutlich diesen Schwächelinien, gelangte so auch an Stellen, die relativ weit vom Hotspot entfernt sind, und hob den Meeresboden dort mit an. Sofern diese Schlussfolgerung korrekt ist, hat sich das erste Problem mit unserer Theorie erledigt; denn alte, nach Nordosten gerichtete Störungen gibt es auch unter dem Mississippi-Tiefland. Diese Brüche in der Kruste könnten in ähnlicher Weise das vom Bermuda-Hotspot gelieferte Magma kanalisiert und so einen Bergrücken geschaffen haben, dessen Längsachse in Südwest-Nordost-Richtung verlief.

Das zweite potenzielle Haar in der Suppe ist die sich zwangsläufig stellende Frage, warum der Bermuda-Hotspot im Gebiet des Mississippi-Tieflands derart tief greifende Veränderungen auslöste, anderswo auf dem nordamerikanischen Kontinent aber kaum Spuren hinterließ. Wir glauben, auch darauf eine Antwort zu haben. Sie ergibt sich aus der Tatsache, dass der Bermuda-Hotspot just zu einem Zeitraum der Erdgeschichte unter dem Mississippi-Tiefland lag, als solche heißen Flecken weltweit Hochkonjuktur hatten und enorme Mengen an Magma Richtung Erdoberfläche beförderten.

Geologen nennen diese Phase mit dramatisch verstärktem Magmatismus und erhöhtem Wärmefluss aus dem Erdinnern – damals entstanden unter anderem viele diamantführende Kimberlitschlote – eine Superplume-Episode (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1995, S. 48). Die Lösung des zweiten Problems könnte also lauten, dass die zerscherte Kruste des Mississippi-Tieflands zufällig am Ort des Geschehens war, als der Bermuda-Hotspot vorübergehend seine Aktivität steigerte.

Unserer Ansicht nach erklärt also die Wanderung der Nordamerikanischen

Platte über diesen kurzzeitig auflebenden heißen Fleck, wie sich ein Abschnitt des Ouachita-Gebirges in einen tiefen Trog verwandeln konnte. Dadurch kehrte sich die Strömungsrichtung der Flüsse im Zentrum des Kontinents um. Statt nach Norden oder Westen entwässerte die Region nun in den Golf von Mexiko.

Unerwartete Erdbeben

Weiteren Rückhalt für dieses Modell liefert ein geologisches Ereignis viel jüngeren Datums. Es fand vor noch nicht einmal 200 Jahren statt. Am 7. Februar 1812 zerstörte das stärkste jemals im kontinentalen Bereich der Vereinigten Staaten registrierte Erdbeben große Teile der Stadt New Madrid (Missouri). Die Erschütterung dürfte nach Schätzungen von Seismologen die Stärke 8 auf der Richterskala erreicht haben und war so heftig, dass sie den Lauf des Mississippi an einer Stelle änderte.

Es ist schwer erklärlich, warum eine solche Katastrophe ausgerechnet das in der Regel ruhige Zentrum des Kontinents heimsuchte – weit entfernt von den Reibungs- und Rutschungsvorgängen an Plattengrenzen, wo Erdstöße relativ häufig sind. Solche so genannten Intraplattenbeben können zwar in Regionen mit alter, stark zerbrochener Kruste auftreten, und New Madrid sitzt über einer solchen Struktur: dem Riftsystem des Mississippi-Tals (auch Reelfoot-Riftsystem genannt). In den meisten Gebieten mit alten Brüchen kommt es jedoch nicht zu seismischen Erschütterungen. So liegt von Dehnungsrissen durchsetzte Kruste unter der gesamten Ostküste der Vereinigten Staaten. Dennoch bebt dort die Erde nur selten – und das schwach.

Warum also neigt speziell die zerbrochene Kruste unter dem Mississippi-Tiefland zu Erdbeben? Ein Hinweis auf den Grund kommt aus Charleston (South Carolina), einem ebenfalls seismisch aktiven Gebiet, in dem sich 1886 ein starkes Beben ereignete. Wie New Madrid liegt Charleston nicht nur über alter, zerbrochener Kruste, sondern auch auf der Spur des Bermuda-Hotspots.

Dasselbe gilt für die Gegend um Manhattan (Kansas), die sich gleichfalls durch ungewöhnlich starke Seismizität auszeichnet und den Südzipfel des zentralen nordamerikanischen Riftsystems bildet. Auch das seismisch aktivste Gebiet im Osten Kanadas, das Sankt-Lorenz-Rift, driftete während der Kreidezeit über einen Hotspot hinweg, der nach dem Great-Meteor-Seeberg im Atlantischen Ozean benannt ist, wo in geologisch junger Zeit submariner Vulkanismus stattgefunden hat.

Es scheint also, als könne die Wanderung einer tektonischen Platte über einen Hotspot alte Verwerfungen reaktivieren und sogar noch nach Dutzenden von Jahrmillionen immer wieder Rutschungen an früheren Bruchflächen auslösen. Der Grund dafür ist vermutlich, dass die erhitzte und gehobene Kruste anschließend lange Zeit benötigt, um sich zu setzen. So erklärt das von uns zusammengefügte Bild nicht nur die Entstehung des Mississippi-Tieflands, sondern beantwortet auch die Frage, warum in Teilen des nordamerikanischen Ostens fern von den Grenzen tektonischer Platten der Erdboden oft beträchtlich schwankt.

Wenn so völlig unterschiedliche Phänomene wie Erdbeben in Kanada und Diamanten in Arkansas in Einklang mit unserer Vorstellung vom Ursprung des Mississippi-Tieflands stehen, spricht das in unseren Augen für die Glaubwürdigkeit dieses Modells. In jedem Fall ist es ein interessanter Gedanke, dass der Verlauf des längsten Flusses in Nordamerika wesentlich durch Vorgänge beeinflusst wurde, die sich 2900 Kilometer unter ihm an der Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern abspielten. Diese frappierende Erkenntnis erinnert einmal mehr daran, wie eng verquickt selbst räumlich weit entfernte Prozesse auf unserem Planeten sein können. ◁

Ein Erdbeben erschütterte 1886 Charleston (South Carolina). Ursache waren Rutschungen an alten Brüchen – eine bis heute anhaltende Reaktion auf die Wanderung dieses Gebiets über den Bermuda-Hotspot vor etwa 60 Millionen Jahren.

JAMES B. MACELWANE ARCHIVES, ST. LOUIS UNIVERSITY UND DSCS SOUTH CAROLINIANA LIBRARY

Roy B. Van Arsdale hat 1979 an der Universität von Utah in Salt Lake City in Geologie promoviert und ist derzeit Professor an der Universität Memphis. In den letzten 15 Jahren galt sein besonderes Interesse der seismisch aktiven Zone von New Madrid. **Randel T. Cox** hat 1995 an der Universität von Missouri in Columbia promoviert und hält heute ebenfalls einen Lehrstuhl an der Universität Memphis. Seine Forschungsinteressen umfassen die Entwicklung des Mississippi-Tals und der angrenzenden Regionen, die Dokumentation prähistorischer Erdbeben in den zentralen USA und Mittelamerika sowie die geologischen Auswirkungen vulkanischer Hotspots.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Schlummernde Bebenherde am Mississippi. Von Arch C. Johnston in: Spektrum der Wissenschaft 6/1982, S. 46

The Mississippi Embayment, North America: A first order continental structure generated by the Cretacious superplume mantle event. Von Randel T. Cox und Roy B. Van Arsdale in: Journal of Geodynamics, Bd. 34, S. 163, 2002

Hotspot origin of the Mississippi Embayment and its possible impact on contemporary seismicity. Von Randel T. Cox und Roy B. Van Arsdale in: Engineering Geology, Bd. 46, S. 201, 1997

Latest pulse of Earth: Evidence for a Mid-Cretaceous super plume. Von Roger L. Larson in: Geology, Bd. 19, S. 547, 1991

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872682.

Eine gewichtige Sache

Seit über einhundert Jahren definiert das Urkilogramm die Grundeinheit der Masse. Nun soll es durch einen genaueren Standard ersetzt werden, der auf einer unveränderlichen Eigenschaft der Natur beruht.

Von Ian Robinson

Heutzutage sind technische Geräte oft schon nach wenigen Jahren hoffnungslos überholt. Da erscheint es geradezu aberwitzig, dass fast alle Messungen von Massen – und damit zusammenhängender Phänomene wie der Energie – von einem Gegenstand abhängen, der seit 117 Jahre in den Gewölben eines kleinen Labors außerhalb von Paris aufbewahrt wird, dem »Internationalen Büro für Gewichte und Maße« *(Bureau International des Poids et Mesures)*. Im Internationalen Einheitensystem SI *(Système International d'Unités)*, oft auch metrisches System genannt, definiert der »Internationale Prototyp des Kilogramms« (IPK) die Grundeinheit der Masse. Dabei handelt es sich um ein zylinderförmiges Objekt aus einer Platin-Iridium-Legierung mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 39 Millimetern.

Die SI-Einheiten werden von der »Allgemeinen Konferenz über Gewichte und Maße« *(Conférence Générale des Poids et Mesures)* und dem »Internationale Komitee für Gewichte und Maße« *(Comité International des Poids et Mesures)* verwaltet. In den vergangenen Jahrzehnten hat die Konferenz bereits mehrere der SI-Basiseinheiten neu definiert, also jene Einheiten, die durch Konventionen festgelegt sind und von denen sich alle anderen ableiten. Ziel ist es, ein konsistentes System zu schaffen, das dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt nützt.

Der Meter und die Sekunde sind bereits über Naturphänomene definiert. Der Meter wurde über die Geschwindigkeit des Lichts festgelegt, die Sekunde durch die Frequenz von Mikrowellen, die ein Atom des Elements Cäsium abstrahlt, wenn es zwischen zwei spezifischen Energiezuständen wechselt.

Das Kilogramm ist heute die einzige verbliebene SI-Grundeinheit, die noch auf einem von Menschen hergestellten Bezugsobjekt basiert. Von einem solchen Artefakt abhängig zu sein, ist für Wissenschaftler problematisch. Da ihre Instrumente immer präziser werden, kann es passieren, dass ihre Messungen genauer sind als die Definition der Grundeinheit. Metrologen – die Fachleute auf dem Gebiet des Messwesens – bemühen sich deshalb, auch die Einheit der Masse auf Naturkonstanten zurückzuführen. Zwei Wege versprechen dabei den größten Erfolg: Einer basiert auf der so genannten Avogadro-Konstante, also der Zahl der Atome, die in zwölf Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C enthalten sind. Der andere bezieht sich auf das Planck'sche Wirkungsquantum, einer Naturkonstante, die den Zusammenhang zwischen der Frequenz eines Photons und seiner Energie herstellt.

Umständlicher Eichprozess

Um den Prototyp des Kilogramms zur Eichung von Massenangaben heranzuziehen, wird bis heute ein aufwändiges Verfahren praktiziert. Etwa alle dreißig Jahre entnehmen die Metrologen den IPK aus seinem Behältnis, um damit Kopien zu eichen, die ihnen von den 51 Unterzeichnerstaaten der so genannten Meter-Konvention zugeschickt werden, einem Vertrag, der die Arbeit der SI-Organisationen regelt. Sobald das gelungen ist, werden diese Kopien verwendet, um Massenstandards in den Mitgliedsstaaten zu kalibrieren. In weiteren Schritten werden auf diese Weise schließlich weltweit Messinstrumente in Laboren und Fabriken geeicht.

Es ist sinnvoll, sich auf einen stabilen, unveränderlichen Standard für Massenmessungen zu beziehen. Doch leider ändert sich die Masse des IPK offenbar mit der Zeit. Vergleicht man die Masse des IPK mit anderen, zur gleichen Zeit angefertigten Massenstandards und zieht alte und neuere Messungen von Naturkonstanten heran, so ergibt sich, dass sich die Masse des IPK in den letzten 100 Jahren um mehr als 50 Mikrogramm verändert haben muss. Durch die Akkumulation von Luftverunreinigungen könnte seine Masse zugenommen, durch Abnutzung jedoch abgenommen haben. Für einen Standard, auf dem Forschung und Industrie in aller Welt aufbauen, ist das nicht akzeptabel.

Ähnliche Schwankungen plagten früher auch die Maßeinheiten von Zeit und Länge. So wurde die Sekunde ursprünglich von der Rotationsgeschwindigkeit der Erde abgeleitet. Diese nimmt jedoch langfristig ab und weist zudem kurzzeitige Veränderungen auf. Um davon unabhängig zu sein, wurde die Sekunde 1967 als »die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Strahlung des Übergangs zwischen zwei Hyperfeinstrukturniveaus eines Cäsium-133-Atoms« neu definiert. Sie ändert sich nicht mit der Zeit und kann jederzeit und überall auf der Welt im Labor gemessen werden.

Obwohl die Definition der Sekunde nun nicht mehr auf einem Artefakt beruht, könnte sie sich immer noch als un- ▷

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA (INRIM), TURIN

Einer der zahlreichen, weltweit genutzten »Nationalen Kilogramm-Standards«. Diese werden gegen das Urkilogramm in Paris kalibriert, einem Präzisions-Zylinder aus einer Platin-Iridium-Legierung.

Eine Siliziumkugel als Prototyp

Bei diesem Verfahren zur Neudefinition des Kilogramms wird die Anzahl der Atome in einer Siliziumkugel bestimmt.

1 Zunächst wird natürliches Silizium gewonnen, das sich aus den drei Isotopen ^{28}Si, ^{29}Si und ^{30}Si zusammensetzt. Mit Fluor reagiert es zu gasförmigem Siliziumfluorid (SiF_4).

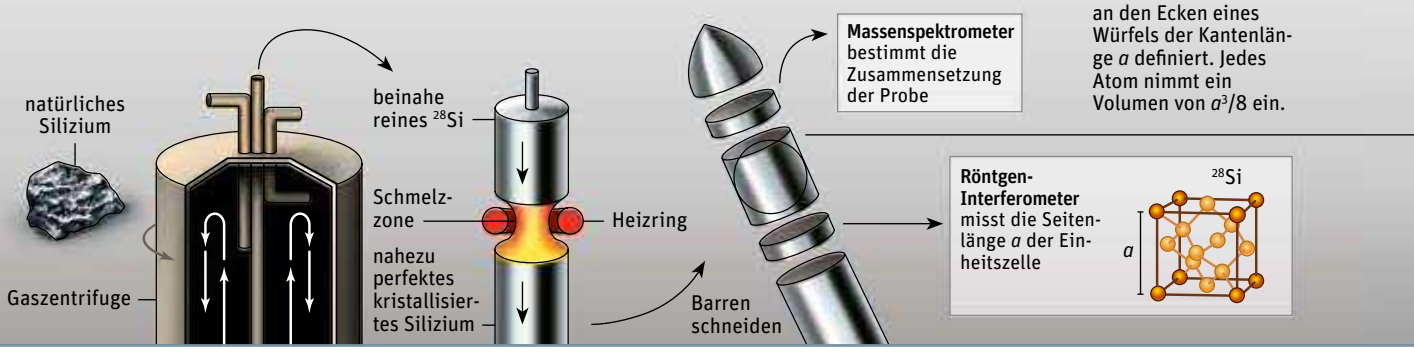
2 Mit Hilfe einer Zentrifuge trennen die Forscher das Silizium-28 von den anderen Isotopen, die geringfügig massereicher sind.

3 Daraus ergibt sich ein festes Material, das zu etwa 99,99 Prozent aus Silizium-28 besteht. Mit einem Verfahren, das in der Industrie genutzt wird, um Halbleiterscheiben für Computerchips herzustellen, produzieren die Forscher einen zylindrischen Barren aus nahezu perfekt kristallisiertem Silizium.

4 Dieser Barren wird anschließend in mehrere Teile zerschnitten, die für unterschiedliche Analysen benötigt werden.

5 Eine dieser Proben untersuchen die Forscher mit einem Massenspektrometer, um die Reinheit des Materials zu prüfen und die Molmasse des Stoffs zu bestimmen.

6 Eine weitere Probe des Materials wird mit einem Röntgen- und einem optischen Interferometer untersucht, um den Abstand der Atome im Kristallgitter zu messen. Daraus folgt die Ausdehnung der Einheitszelle als kleinster regelmäßiger Grundeinheit des Kristalls. Diese wird durch die acht Atome an den Ecken eines Würfels der Kantenlänge a definiert. Jedes Atom nimmt ein Volumen von $a^3/8$ ein.



▷ zureichend erweisen, denn sie hängt von einem quantenphysikalischen Prozess ab, auf den elektromagnetische Felder spürbar einwirken. Forscher entwickeln mit den optischen Uhren gegenwärtig einen Typ neuartiger, präziser Atomuhren, der schon bald eine weitere Neudefinition der Sekunde erfordern könnte.

Demgegenüber ist der Längenstandard recht stabil. Ursprünglich beruhte die SI-Definition des Meters ebenfalls auf einem Artefakt: einem extrem stabilen Platin-Iridium-Barren, in den zwei Linien in wohldefiniertem Abstand eingeritzt wurden. Im Jahr 1983 wurde der Meter dann als »die Länge des Wegs, den das Licht im Vakuum im Zeitintervall von 1/299 792 458 Sekunden zurücklegt« neu definiert. Diese Definition sollte auch dem künftigen technischen Fortschritt standhalten, denn sie ist mit einer der wichtigsten Naturkonstanten verknüpft, der Geschwindigkeit des Lichts, das im Vakuum genau 299 792 458 Meter in der Sekunde zurücklegt. Gelingt es, die Frequenz elektromagnetischer Strahlung genauer zu messen, wird man auch die Länge des Meters präziser bestimmen können, ohne ihn neu definieren zu müssen.

Welche Schritte zu unternehmen sind, um das Kilogramm auf der Basis einer physikalischen Konstante neu festzulegen, sodass es sich in den bestehenden Gebrauch einfügt, ist klar. Zunächst müssen Metrologen die betreffenden Konstanten messen und auf der Grundlage des gegenwärtigen Kilogrammstandards fixieren. Erst dann können sie in die Neudefinition eingehen, damit ein nahtloser Übergang zwischen alter und neuer Definition gewährleistet ist. Jedes hinreichend ausgestattete Labor sollte den neuen Massenstandard reproduzieren können.

Viel versprechend erscheint es, das Kilogramm mit der Masse eines Atoms zu verknüpfen. Dabei bietet es sich zunächst an, die Avogadro-Konstante zu fixieren. Diese ist definiert als die Anzahl der Atome in zwölf Gramm des Kohlenstoffisotops ^{12}C, einem so genannten Mol (»Grammatom«). Neuen Messungen zufolge beträgt ihr Wert ungefähr $6{,}02 \cdot 10^{23}$ oder 602 Trilliarden pro Mol. Daraus erkennt man, wo für Metrologen das Problem liegt: darin, eine

In Kürze

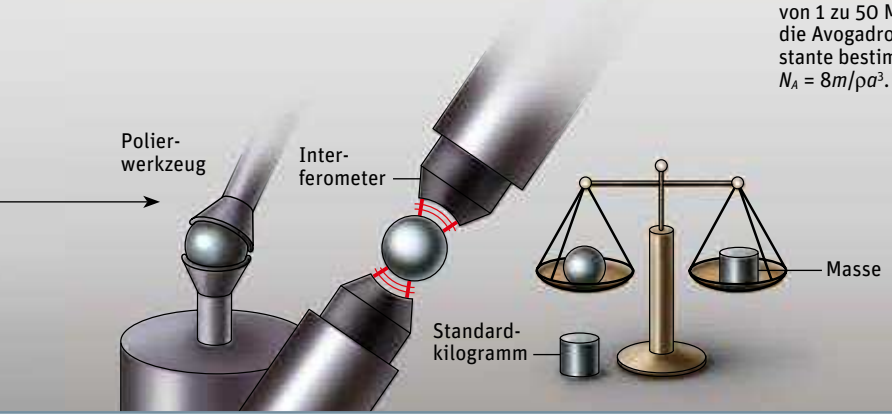
- Seit über hundert Jahren definiert ein kleiner, pflaumengroßer Metallzylinder das Kilogramm, im metrischen System die **Basiseinheit der Masse**. Der technische Fortschritt erfordert eine Neudefinition, die grundlegende Eigenschaften der Natur nutzt.
- Forscher verfolgen zwei Wege. Die eine Methode bezieht sich auf die Anzahl der Atome in einem Kilogramm **reinen Siliziums**. Die andere nutzt quantenmechanische Effekte, um äußerst genau die mechanische Kraft mit der elektrischen Kraft zu vergleichen, die jeweils nötig ist, um ein Kilogramm Masse anzuheben.
- Diese Verfahren sollen das Kilogramm mit einer Genauigkeit von zumindest 1 zu 50 Millionen definieren und präzise Messungen **fundamentaler physikalischer Konstanten** ermöglichen.

7 Unterdessen schleifen die Forscher mit äußerst präzisen Schleifwerkzeugen aus einem Zylinderteil eine nahezu perfekte Kugel.

8 Anschließend messen sie den Kugeldurchmesser.

9 Mit einem aufwändigen Verfahren wird die Kugel gewogen und ihre Masse mit derjenigen eines existierenden Kilogrammstandards verglichen.

10 Aus der Masse der Kugel und ihrem Durchmesser bestimmen die Forscher ihre Dichte (ρ). Kombiniert man diese mit dem von einzelnen Atomen eingenommenen Volumen sowie der Molmasse m des Siliziums, kann man mit einer Präzision von 1 zu 50 Millionen die Avogadro-Konstante bestimmen: $N_A = 8m/\rho a^3$.



ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTIANSEN; FOTO: CSIRO, AUSTRALIAN CENTER FOR PRECISION OPTICS

wägbare Menge von Atomen zu zählen. Selbst in den genauesten Waagen verhindern es »Schmutzeffekte«, Massen zu unterscheiden, die um weniger als 100 Nanogramm voneinander abweichen. Das Urkilogramm soll jedoch zumindest mit einer Präzision von 1 zu 50 Millionen definiert werden. Dafür müsste man die Atome zählen, die in 5 Gramm Kohlenstoff-12 (^{12}C) enthalten sind. Selbst wenn es gelänge, pro Sekunde eine Billion einzelner Atome zu zählen, würde man dafür etwa 7000 Jahre benötigen – ein aussichtsloses Unterfangen.

Wie man Atome zählt

Einfacher ist es, die Anzahl der Atome in einem Kristall zu ermitteln, indem man dessen Volumen durch dasjenige teilt, welches ein einzelnes Atom darin einnimmt. Wiegt man den Kristall, lässt sich aus der Masse eines Atoms dieses Kristalls relativ zu einem Kohlenstoff-12-Atom die Avogadro-Konstante bestimmen. Der Neudefinition des Kilogramms wäre man damit einen großen Schritt näher gekommen.

Um auf diese Weise das Kilogramm über die Atommasse zu eichen, muss man zunächst den Abstand der Atome in einem nahezu perfekten Kristall messen, in dem die Atomzahl pro Einheitszelle bekannt ist. Daraus folgt das von einzelnen Atomen eingenommene Volumen. Weist der Kristall eine bekannte Masse auf, lässt sich daraus auf die Masse eines seiner Atome schließen. Aus dem Verhältnis der Molmasse des Isotops, aus dem der Kristall besteht, zur Masse des Atoms folgt die Avogadro-Konstante.

Dies zu tun ist schwieriger, als es klingt, denn dafür ist eine beträchtliche Genauigkeit erforderlich. Tatsächlich ist das Vorhaben so teuer und komplex, dass weltweit kein staatliches Eichlabor über die nötigen Mittel verfügt. Deshalb hat sich ein Konsortium von Forschungslabors in Australien, Belgien, Deutschland, Großbritannien, Italien, Japan und den USA zur »Internationalen Avogadro-Koordination« *(International Avogadro Coordination)* zusammengeschlossen.

Das Vorhaben kann nur gelingen, wenn der zu untersuchende Kristall eine nahezu perfekte Struktur aufweist, also äußerst wenige Gitterfehler und Unreinheiten enthält. Da die Halbleiterindustrie im Züchten großer, weit gehend perfekter Einkristalle aus Silizium inzwischen sehr erfahren ist, wurde dieses Element ausgewählt. Sind die Messungen am Siliziumkristall geglückt, können Metrologen die Ergebnisse zur Definition des Mols, die auf Kohlenstoff-12-Atomen beruht, in Beziehung setzen, indem sie extrem genaue Messungen der Atommassen von Silizium und Kohlenstoff heranziehen, die mit einem Massenspektrometer bestimmt wurden.

Zunächst schnitten die Forscher der Avogadro-Koordination mehrere Stücke aus dem Rohkristall. Aus einem dieser Stücke wurde die ein Kilogramm schwere Kugel geschliffen (siehe Kasten oben). Die Kugelform ist vorteilhaft, weil sie keine Ecken aufweist, die leicht beschädigt werden könnten. Außerdem gibt es ausgereifte Techniken, um Silizium zu einer nahezu perfekten Kugel zu schleifen. Australischen Experten gelang die Produktion einer 93,6 Millimeter durchmessenden Kugel, die um weniger als 50 Nanometer von der Idealform abweicht. Zum Vergleich: Würde jedes Siliziumatom zwei Zentimeter durchmessen, wäre diese Kugel etwa so groß wie die Erde, die Höhenunterschiede würden jedoch maximal sieben Meter betragen!

Um das Volumen der Kugel genau genug zu bestimmen, mussten die Wissenschaftler ihren mittleren Durchmesser bis auf einen Atomdurchmesser genau ▷

▷ messen. Das gelang, indem sie die Kugel in ein Vakuum setzten und von gegenüberliegenden Seiten mit Laserstrahlen bekannter Frequenz beleuchteten. Aus der unterschiedlichen Länge der Lichtwege (in Einheiten der Wellenlänge) bei Messungen mit und ohne Kugel ergab sich deren Durchmesser in Metern, da die Wellenlänge des Laserlichts gleich der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum dividiert durch die Frequenz ist. Unter Berücksichtigung geringer Abweichungen von der Idealform konnten die Forscher das Kugelvolumen ermitteln.

Um das von einzelnen Atomen eingenommene Volumen zu bestimmen, schnitten die Forscher den Kristall entlang zweier Gitterebenen. Ein Kristallstück konnte so gegen das andere versetzt werden, ohne dass sich der Winkel zwischen ihren Kristallgittern änderte. In ein Vakuum gebracht und mit kurzwelliger Röntgenstrahlung beleuchtet, gelang es, während einer allmählichen Verschiebung der Proben zu zählen, wie viele Gitterschichten zurückgelegt wurden. Davon unabhängig maßen die Forscher den Absolutbetrag der vollzogenen Verschiebung mit einem optischen Interferometer, das Licht längerer Wellenlänge nutzt. Mit Hilfe der bekannten Kristallstruktur folgte daraus das von einem Atom eingenommene Volumen.

Präzise Mehrfachwägung

Um die Masse der kristallinen Kugel zu bestimmen, nutzten die Metrologen das Verfahren der »Substitutionswägung«. Diese bei präzisen Messungen übliche Methode ersetzt eine einzelne Wägung durch eine Wägereihe, bei der dieselben Massen mehrfach gewogen werden. Benötigt wird dafür insbesondere eine so genannte Leermasse. Diese braucht nicht genau bekannt zu sein, muss jedoch einen äußerst stabilen Massenwert aufweisen.

Zunächst wurde die Siliziumkugel auf dem einen Arm der Waage platziert, eine Leermasse von etwa einem Kilogramm auf dem anderen. Nachdem die Kugel durch eine Masse ersetzt wurde, die im Rahmen des IPK-Standards bekannt war, wiederholten die Forscher die Wägung. Wird der Austausch vorsichtig genug durchgeführt, liefert der auf der Skala der Waage ablesbare Unterschied unmittelbar die Massendifferenz zwischen der Kugel und dem Massenstandard und damit auch die Masse der Kugel selbst. Durch diese Methode lassen sich Wägefehler stark reduzieren, die minimal unterschiedliche Armlängen der Waage hervorrufen können.

Aus weiteren Proben des Siliziums bestimmten die Forscher die relativen Häufigkeiten der Siliziumisotope ^{28}Si, ^{29}Si und ^{30}Si im Kristall, um deren Beiträge zur Kugelmasse zu berücksichtigen. Dazu benutzten sie ein Massenspektrometer, mit dem sich die elektrisch geladenen Isotope anhand ihres unterschiedlichen Masse-Ladungs-Verhältnisses trennen lassen.

Inzwischen hat die Internationale Avogadro-Koordination die Messungen an Kugeln aus natürlichem Silizium nahezu abgeschlossen. Zwar gelang es den Metrologen, die Anzahl der Atome in einer Ein-Kilogramm-Kugel mit einer Genauigkeit von 3 zu 10 Millionen zu be-

Von der Watt-Waage zum Kilogrammstandard

Bei diesem Verfahren zur Neudefinition des Kilogramms wird die Masse durch ihr Energie-Äquivalent gemessen. Die Kraft, die in einem Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt, wird durch die Gewichtskraft einer Masse genau ausgeglichen. Dazu wird eine so genannte Watt-Waage benutzt. Am rechten Ende der Waage befindet sich ein Gegengewicht. An der linken Seite hängt ein Standard-Kilogramm, darunter eine horizontal liegende Spule. Die Gewichtskraft des Standard-Kilogramms *(mg)* ist das Produkt der Masse *m* mit der Schwerebeschleunigung *g*.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, UK / CROWNE 2005

stimmen. Für einen neuen Standard ist das jedoch zu unsicher. Um eine noch höhere Genauigkeit zu erreichen, arbeitet das Team derzeit an der Herstellung einer Kugel aus reinem Silizium-28. Diese wird voraussichtlich 1,25 bis 2,5 Millionen US-Dollar kosten. Mit russischen Gaszentrifugen, die ursprünglich der Produktion von waffenfähigem Uran dienten, trennen Mitarbeiter der Koordination gegenwärtig die Silizium-Isotope. Bis 2010 will das Konsortium eine Genauigkeit erreichen, die besser als 1 zu 50 Millionen ist.

Der zweite Weg zur Neudefinition des Kilogramms basiert auf der Idee, die Masse über ihr Energie-Äquivalent zu bestimmen. Genutzt wird dabei die Äquivalenz von Masse und Energie, die Einstein mit seiner berühmten Formel $E = mc^2$ beschrieb. Ihr zufolge sollte man die Masse durch die Energie definieren können, in die sich eine bestimmte Materiemenge umwandeln lässt. Wie schon das Zählen einzelner Siliziumatome ist dies nicht einfach, denn schon bei der Umwandlung weniger Atome werden gewaltige Energiemengen frei.

Leichter ist es, auf vergleichsweise konventionelle Weise elektrische und ▷

Erster Schritt: Wägen

Die Spule wird in ein radiales Magnetfeld mit einer gleichförmigen Flussdichte *B* gesenkt (siehe Bild 1). Fließt ein elektrischer Strom *I* hindurch, wirken elektromagnetische Kräfte auf sie ein – ähnlich wie in einem Elektromotor. Weist der Draht in der Spule die Länge *L* auf und ist dieser im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien orientiert, ergibt sich diese Kraft als das Produkt *BLI*. Gleicht die elektrische Kraft auf die Spule ihre Gewichtskraft aus, gilt: $mg = BLI$, woraus folgt: $m = BLI/g$.

Zwar misst die Apparatur eine Masse elektrisch, doch es ist nahezu unmöglich, so das Produkt *BL* mit ausreichender Genauigkeit zu eichen.

Zweiter Schritt: Bewegung

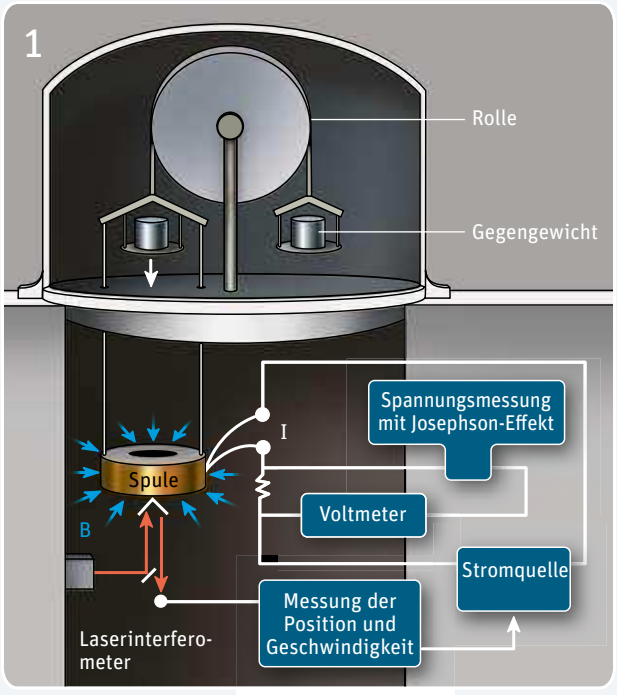
Bewegt man die Spule (siehe Bild 2) mit einer konstanten Geschwindigkeit *v* im rechten Winkel zu den Magnetfeldlinien, so wird darin eine Spannung $U = BLv$ induziert. Dies ist der gleiche Vorgang, der in einem elektrischen Generator genutzt wird.

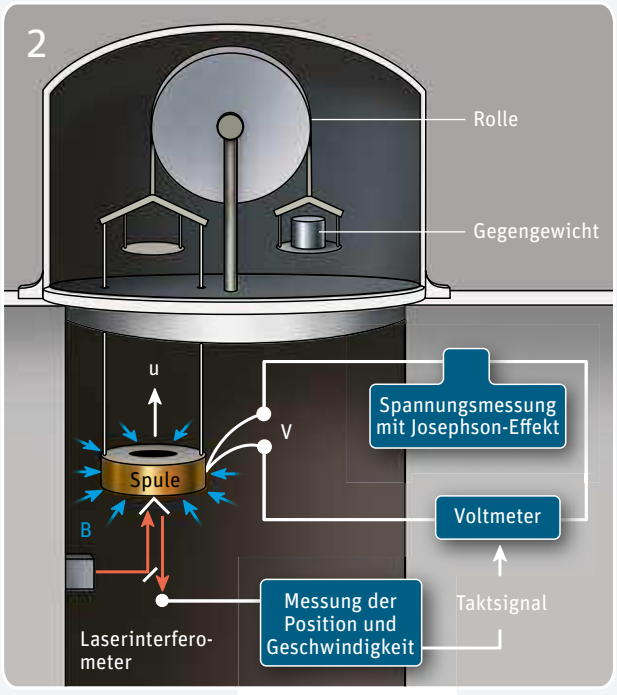
Dieser Teil des Experiments ermöglicht es den Forschern, das im ersten Schritt nur grob bestimmbare Produkt *BL* aus den Gleichungen zu eliminieren. Ist die elektrische Leistung *UI* (das Produkt von Spannung und Stromstärke) gleich der mechanischen Leistung *mgv* (das Produkt von Gewichtskraft und Geschwindigkeit), so folgt aus $UI = mgv$ die Beziehung $m = UI/gv$.

Da die beiden Messungen zeitversetzt durchgeführt werden, wird tatsächlich gar keine Leistung ermittelt – das Konzept der »virtuellen« Leistung erlaubt es den Wissenschaftlern, unvermeidbare Energieverluste durch Reibung und die Erwärmung der Spule zu ignorieren und dadurch eine deutlich höhere Präzision zu erzielen.

Während des Experiments überwachen mehrere hochpräzise metrologische Systeme die Watt-Waage. Ein Laser-Interferometer misst die Bewegung der Spule, wobei die Zeit mit einem genau definierten Referenzsignal bestimmt wird. Ein empfindliches Gravimeter überwacht zugleich den lokalen Zug des irdischen Gravitationsfeldes.

Mit speziellen Instrumente, die auf dem Josephson-Effekt sowie dem Quanten-Hall-Effekt basieren (siehe Kasten S. 82), messen die Metrologen die Spannung und den Strom mit außergewöhnlicher Genauigkeit. Weil diese Größen über quantenmechanische Phänomene gemessen werden, können sie die Beziehung zwischen Kilogramm und Planck'schem Wirkungsquantum äußerst genau ermitteln.





INFOGRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN

▷ magnetische Energien zu vergleichen. Dabei müssen die Metrologen allerdings die auftretenden Energieverluste in den Griff bekommen. Welche Hindernisse dabei zu überwinden sind, zeigt sich, wenn wir uns einen Elektromotor vorstellen, der eine Masse gegen die Schwerkraft anhebt. Unter idealen Bedingungen würde die gesamte dem Motor zugeführte elektrische Energie E die potenzielle Energie des um die Strecke h angehobenen Objekts vergrößern. Es gilt demzufolge $E = mgh$, woraus die Masse $m = E/gh$ folgt. Dabei ist g die Schwerebeschleunigung, die mit einem Präzisionsgravimeter bestimmt werden kann. In der Praxis ist diese Art der Massenbestimmung auf Grund von Energieverlusten im Motor und anderen Teilen des Experiments nahezu unmöglich. Zwar versuchten Wissenschaftler, ähnliche Experimente an Objekten durchzuführen, die auf Grund des so genannten Meißner-Ochsenfeld-Effekts der Supraleitung zum Schweben gebracht wurden. Über eine Genauigkeiten von 1 zu 1 Million kamen sie jedoch nicht hinaus.

Eine größere Hoffnung bietet die so genannte Watt-Waage, die Bryan Kibble vom britischen Nationalen Physikalischen Laboratorium (NPL) vor 30 Jahren ersann und die das Problem des Energieverlusts durch die Messung einer »virtuellen Kraft« vermeidet (siehe Kasten S. 80/81). Diese Methode setzt das Kilogramm mit dem Meter, der Sekunde, dem elektrischen Widerstand (in Ohm) sowie der elektrischen Spannung (in Volt) in Bezug, was zwei Prozesse der Quantenmechanik ermöglichen: der Josephson-Effekt und der Quanten-Hall-Effekt (siehe Kasten unten). Daraus folgt ein sehr präziser Wert des Planck'schen Wirkungsquantums.

Die Watt-Waage ist eine konventionelle Balkenwaage, an deren einem Arm das zu messende Objekt der Masse m hängt, während sich am anderen Arm eine Spule der Gesamtlänge L in einem starken magnetischen Feld B befindet. Im Experiment wird zunächst ein Strom I durch die Spule geschickt und so eine Kraft erzeugt (das Produkt BLI), welche die Gewichtskraft des Objekts (das Produkt mg) ausgleicht. Danach wird das Objekt entfernt und der Strom abgeschaltet.

Anschließend wird die Spule mit einer Geschwindigkeit v durch das Magnetfeld bewegt und dabei die induzierte Spannung $U = BLv$ gemessen. Dadurch lässt sich das Produkt BL bestimmen, das auf anderem Weg kaum ausreichend genau zu bestimmen ist. Sind das Magnetfeld und die Spule stabil genug, damit das Produkt BL in beiden Teilen des Experiments den gleichen Wert besitzt, lassen sich beide Messungen zur Beziehung $mgv = UI$ kombinieren. Diese be- ▷

Quanteneffekte treffen auf klassische Physik

Die Grundprinzipien der Watt-Waage waren zwar schon den Physikern des 19. Jahrhunderts vertraut. Dass man damit auf der Grundlage von Naturkonstanten Massen wägen kann, verdanken wir jedoch zwei Effekten der Quantenphysik, die erst in den vergangenen 40 Jahren entdeckt wurden: dem Quanten-Hall-Effekt sowie dem Josephson-Effekt. Beide Phänomene tauchen bei Temperaturen unterhalb von 4,2 Kelvin auf, wenn Helium flüssig ist.

Josephson-Effekt

Ein Josephson-Kontakt besteht aus zwei Supraleitern, die durch eine kleine isolierende Barriere getrennt sind. Elektronenpaare können diese durch den quantenmechanischen Tunneleffekt überqueren. Wird ein solcher Kontakt mit Mikrowellen bestrahlt, absorbieren die Elektronenpaare im Supraleiter Photonen und können die Lücke überwinden. Unter diesen Bedingungen muss die Spannung über der Lücke stets ein kleines Vielfaches von $hf/2e$ betragen, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum, f die Frequenz der Mikrowellen und e die Elementarladung ist. Diese Beziehung gilt exakt und liefert deshalb einen unübertroffen genauen Standard für die Spannungsmessung.

Quanten-Hall-Effekt

Der Hall-Effekt tritt in allen Leitern und Halbleitern auf, wenn ein elektrischer Strom durch ein Material fließt, das sich in einem Magnetfeld befindet. Das Magnetfeld übt eine Kraft auf die Ladungsträger aus, die senkrecht zu den Feldlinien und der Richtung des elektrischen Stroms gerichtet ist. Dadurch sammeln sich elektrische Ladungen an den Kanten des Geräts, die sowohl eine Spannung als auch ein elektrisches Feld erzeugen, die der magnetischen Kraft auf die Ladungsträger entgegenwirken. Diese Spannung ist proportional zum angelegten Strom und zur Stärke des Magnetfelds. Deshalb kann der Effekt als Widerstand gegen den elektrischen Strom (»Hall-Widerstand«) beschrieben werden, der proportional zur magnetischen Feldstärke ist.

In bestimmten Supraleitern kommt es bei tiefen Temperaturen (1,2 bis 0,03 Kelvin) und starken Magnetfeldern zu einer quantenmechanischen Variante des Hall-Effekts. Dabei ist der Quanten-Hall-Widerstand durch quantenmechanische Effekte sowohl vom Magnetfeld als auch vom Material des Halbleiters unabhängig und beträgt h/ne^2, wobei n eine kleine natürliche Zahl ist. Deshalb eignet er sich als hochpräziser Standard zur Messung elektrischer Widerstände.

Atrium

WOHNEN GARTEN ARCHITEKTUR DESIGN

LASSEN SIE SICH INSPIRIEREN VON ...

... traumhaften Häusern, tollen Einrichtungen und aktuellen Marktneuheiten aus aller Welt. Wir berichten das ganze Jahr über die wichtigsten Messen und Ausstellungen, liefern in jeder Ausgabe intelligente Antworten zu Einrichtung und Ausstattung im Haus und in der Wohnung.

>> GARANTIERT OHNE KOSTEN!

Sie erhalten Ihr ATRIUM-Probeheft garantiert gratis.

>> GARANTIERT PORTOFREI!

Keine Portokosten, denn das übernimmt ATRIUM für Sie.

>> GARANTIERT MIT SPARVORTEIL!

Möchten Sie ATRIUM weiterlesen, brauchen Sie nichts zu unternehmen. ATRIUM wird Ihnen dann pünktlich jeden zweiten Monat für z. Zt. nur € 6,30 statt € 7,- im Einzelkauf nach Hause geliefert. Sie sparen also 10%!

>> GARANTIERT FAIR!

Sie lesen nur solange Sie möchten und können Ihr Abo nach Ablauf der Bezugsdauer jederzeit kündigen. Eine kurze Mitteilung genügt. Das Geld für bereits bezahlte, aber noch nicht gelieferte Ausgaben erhalten Sie natürlich umgehend zurück.

>> GARANTIERT OHNE RISIKO!

Ihr Widerrufsrecht: Diese Anforderung können Sie innerhalb einer Woche nach Absenden der Karte beim ATRIUM-Leserservice schriftlich widerrufen. Rechtzeitiges Absenden genügt.

>> Jetzt gratis testen!

BESTELLEN SIE JETZT UNTER: **Telefon: 0 40 - 23 670 - 430**

Fax: 0 40 - 23 670 - 105 | E-Mail: abo@archithema.com | Internet: www.archithema.com
oder senden Sie den Coupon an: ATRIUM Abo-Service Postfach 103245 20022 Hamburg

JA, ICH WILL ATRIUM AUSFÜHRLICH KENNENLERNEN.

Senden Sie mir bitte die nächste Ausgabe kostenlos an meine nachstehende Adresse. Wenn mich ATRIUM überzeugt und ich nicht 10 Tage nach Erhalt des Kennenlern-Heftes schriftlich abbestelle, erhalte ich **6 Hefte von ATRIUM für nur Euro 37,80 anstatt Euro 42,-.** Die Zustellgebühren übernimmt der Verlag. Mein Abo kann ich nach Ablauf der Bezugsdauer jederzeit schriftlich kündigen.

Name, Vorname

Straße u. Hausnummer

PLZ u. Ort

Telefon | Datum

E-Mail

Bitte informieren Sie mich über interessante Angebote per E-Mail (ggf. streichen)

Ich möchte wie folgt zahlen: ☐ Bequem und bargeldlos durch Bankeinzug ☐ Gegen Rechnung (Bitte keine Vorauszahlung. Rechnung abwarten)

Geldinstitut

Konto-Nr. | Bankleitzahl

X Unterschrift

00061/00084

▷ schreibt das Gleichgewicht zwischen der mechanischen Leistung (das Produkt von Kraft und Geschwindigkeit, *mgv*) und der elektrischen Leistung (das Produkt von Spannung und Stromstärke, *UI*). Da die Messungen von Spannung und Stromstärke auf der einen Seite sowie Gewicht und Geschwindigkeit auf der anderen Seite jeweils getrennt ausgeführt werden, hängt das Ergebnis nicht davon ab, dass die Leistung tatsächlich in irgendeinem Teil des Experiments verloren geht, was sich durch die Erwärmung der Spule oder Reibung bei der Bewegung nicht gänzlich vermeiden lässt. Demzufolge können die Forscher mit der Anordnung eine »virtuelle Leistung« ermitteln.

Neubestimmte Naturkonstanten

Die Metrologen messen den Strom während der Wägung, indem sie ihn durch einen Widerstand leiten, der zuvor mit Hilfe des Quanten-Hall-Effekts geeicht wurde. Die am Widerstand anliegende Spannung sowie die in die Spule induzierte Spannung werden mit Hilfe des Josephson-Effekts gemessen, der ebenfalls quantenmechanischer Natur ist (siehe Kasten auf S. 82). Die Forscher können deshalb die elektrische Leistung in Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums ausdrücken. Da die anderen Terme in der Gleichung nur von der Zeit und der Länge abhängen, kann letztlich die Masse in Einheiten des Planck'schen Wirkungsquantums, des Meters und der Sekunde bestimmt werden – also ausschließlich auf der Grundlage von Naturkonstanten.

Zwar scheint sich diese Methode recht direkt zur Eichung des Kilogramms zu eignen, um jedoch die angestrebte Genauigkeit von 1 zu 100 Millionen zu erreichen, müssen die wichtigsten Größen in dem Experiment mit einer Genauigkeit gemessen werden, die an die Grenzen heutiger Möglichkeiten stoßen. Zunächst ist die Schwerebeschleunigung extrem genau zu bestimmen. Dann muss das gesamte Verfahren in einem Vakuum durchgeführt werden, damit weder der Auftrieb in der Luft noch die Strahlenbrechung die Geschwindigkeitsmessung beeinflussen, die mit einem Laser-Interferometer vorzunehmen ist. Die Metrologen müssen außerdem dafür sorgen, dass die Richtung der auf die Spule wirkenden Kraft exakt vertikal verläuft; dafür müssen sie Teile der Apparatur auf mindestens 10 Bogensekunden und 10 Mikrometer exakt ausrichten. Schließlich müssen sie genau verstehen, wie sich das Magnetfeld zwischen den beiden Teilen des Experiments verhält. Das erfordert, dass sich die Temperatur des Permanentmagneten höchstens im Mikrokelvinbereich langsam und gleichmäßig ändern darf.

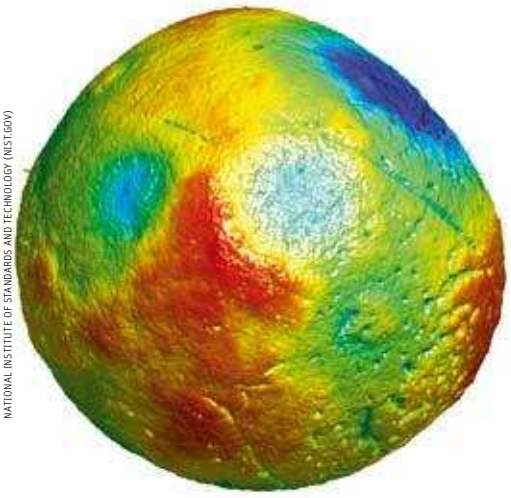
Drei Institute haben inzwischen solche Watt-Waagen entwickelt: das Schweizer Bundesamt für Metrologie (Metas), das Nationale Institut für Standards und Technologie (Nist) in den USA und das NPL in Großbritannien. Auch die Forscher des Institut National de Métrologie (INM) sowie am eingangs erwähnten BIPM in Frankreich entwickeln entsprechende Apparaturen. Gelingen diese Anstrengungen, so wird es schließlich fünf voneinander unabhängige Instrumente geben, die unterschiedlich aufgebaut sind. Das ist nützlich, um systematische Fehler zu erkennen und auszuschließen. Am Ziel soll eine Messung des Planck'schen Wirkungsquantums mit einer Genauigkeit 1 zu 100 Millionen stehen, vielleicht sogar mit 1 zu 200 Millionen.

Leider führen bisherige Messungen der Siliziumkristalle sowie der Watt-Waagen zu Massenangaben des Kilogramms, die um mehr als 1 zu 1 Million voneinander abweichen. Forscher müssen die Abweichungen auf ein Hundertstel dieser Differenz reduzieren, bevor sie das Kilogramm neu definieren können.

Gelingt diese Anstrengung, sind die Konsequenzen weit reichend. Zum einen werden die Avogadro-Konstante und das Planck'sche Wirkungsquantum genauer bestimmt sein. Sobald Letzteres auf diese Weise fixiert ist und die Wissenschaftler auch das Ampere – dessen Unsicherheit damit gekoppelt ist – neu definiert haben, lassen sich auch die Elementarladung und andere wichtige Größen sehr genau angeben.

Das Internationale Komitee für Gewichte und Maße treibt die nationalen Eichanstalten an, bis zum Jahr 2011 nicht nur das Kilogramm neu zu definieren, sondern auch das Ampere, das Kelvin und das Mol. Anschließend werden einige Länder die notwendigen Geräte bauen, um diese Definitionen praktisch zu nutzen.

Andere Länder werden ihre Kilogrammstandards vermutlich auf die Messungen und Apparaturen derjenigen Labore beziehen, welche die Neudefinition erarbeiteten. Damit ist die Gefahr weit gehend gebannt, dass das einzige Objekt, auf dem die Definition beruht, beschädigt oder kontaminiert werden könnte. Das neue System wäre robust und stabil. Es würde dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt erlauben, mit unvermindertem Tempo voranzuschreiten. ◁



Die Farben dieser dreidimensionalen digitalen Darstellung einer Siliziumkugel zeigen die Abweichungen von der perfekten Kugelform, wie sie mittels eines Röntgen-Interferometers gemessen wurden.

Ian Robinson leitet die Arbeitsgruppe für elektrische Methoden zur Überwachung der Stabilität des Kilogramms des »Consultative Committee on Electricity and Magnetism« am Nationalen Physikalischen Laboratorium Großbritanniens in Teddington.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Replacing the kilogram. Von B. P. Kibble und I. A. Robinson in: Measurement Science and Technology, Bd. 14, S. 1229, 2003

Tracing Plancks constant to the kilogram by electromechanical methods. Von A. Eichenberger et al. in: Metrologia, Bd. 40, S. 356, 2003

History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant. Von P. Becker in: Reports on Progress in Physics, Bd. 64, S. 1945, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872688.

SINNESPHYSIOLOGIE

Ein Kompendium optischer Täuschungen

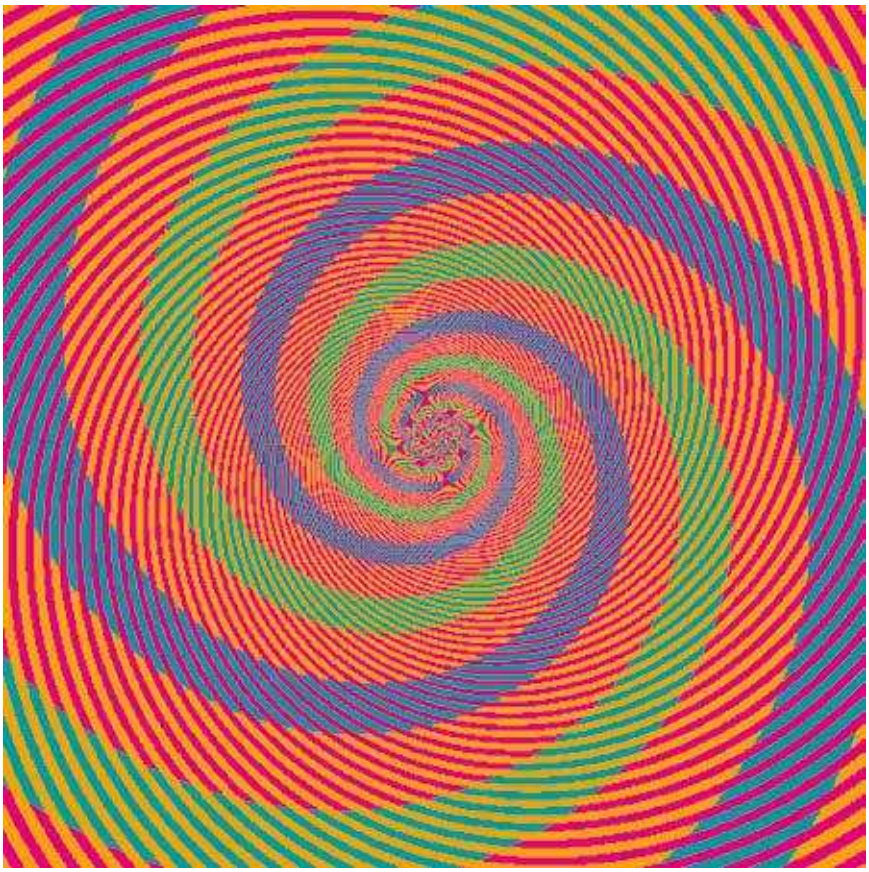
Die beeindruckende Materialfülle hilft über Schwächen der Darstellung hinweg.

Wenn wir morgens die Augen aufschlagen, umgibt uns unmittelbar unsere Welt – dreidimensional und farbig, stabil und allumfassend. Das geschieht mühelos und in einem Bruchteil einer Sekunde; und doch steckt dahinter eine hochkomplexe Wahrnehmungsleistung. Viele der dabei ablaufenden Verarbeitungsvorgänge sind weit davon entfernt, verstanden oder gar in nachvollziehbare Algorithmen abgebildet zu werden.

Noch erstaunlicher als diese Diskrepanz zwischen der internen Komplexität und der erlebten Leichtigkeit des visuellen Erlebens ist es, wie sicher und stabil unsere Wahrnehmung trotzdem ist. Deshalb kommen wir in der Regel nicht auf die Idee, dass die Welt, so wie wir sie erleben, eine Konstruktion unseres Wahrnehmungsapparates ist.

Thomas Ditzinger, Wissenschaftspublizist und Lektor beim Springer-Verlag in Heidelberg, gibt dem Leser eine Menge Material an die Hand, um Fehler dieser Konstruktion in Gestalt optischer Täuschungen zu erleben. Zahlreiche, manchmal frappierende Abbildungen führen unseren Wahrnehmungsapparat in die Irre und offenbaren damit ein schwaches Echo der Algorithmen, die im Hintergrund unsere visuelle Welt konstruieren.

In sieben Kapiteln erörtert der Autor praktisch alle Aspekte der visuellen Wahrnehmung und die dazugehörigen Täuschungen von Raum, Fläche, Farbe, Bewegung und Entfernungssehen. Besonders faszinierend und verblüffend sind dabei die Abschnitte über mehrdeutige Wahrnehmungen und mehrere »autokinetische Bilder«, die ständig in Bewegung zu sein scheinen, obgleich sie ganz gewöhnlich auf Papier gedruckt sind.



Demonstration der Farbkonstrastverstärkung nach Akiyoshi Kitaoka: Die beiden grün und blau erscheinenden Spiralen sind in Wirklichkeit genau gleichfarbig.

Als umfangreiches Bilderbuch der optischen Täuschungen ist das Werk eine wahre Fundgrube. Leider wird der gute erste Eindruck durch den Text deutlich getrübt.

Man kann ja durchaus die Auseinandersetzung mit einem schwierigen wissenschaftlichen Thema als Reise darstellen; aber so, wie Ditzinger einen Busfahrer inklusive einer Schafherde mehrfach bemüht, um bestimmte Sachverhalte darzustellen, wirkt es reichlich gequält. Einige Passagen sind in etwa so verdaulich wie ein Physikbuch der 1970er Jahre. Typische Anfängerfehler haben die Schlusskorrektur unbeschadet überstanden; so nennt Ditzinger die farbempfindlichen Rezeptorzellen in der Netzhaut durchgängig »Zäpfchen« statt Zapfen. Ausgerechnet bei der ersten Abbildung, die eine Wahrnehmungsillusion zeigt, sind in der Beschreibung linkes und rechtes Auge verwechselt, sodass man die Täuschung nur erlebt, wenn man sich nicht an die Textbeschreibung hält.

Auch das Fehlen der Rasterung in einer Abbildung eines Malteserkreuzes (S. 75) lässt den unbedarften Leser zunächst ratlos. Erst auf den folgenden Seiten ist das Kreuz dann so abgebildet, dass sich die beschriebene Illusion einstellt. In einigen weiteren Abbildungen, welche die Ideen der Gestalttheorie zum Inhalt haben, treibt die erwähnte Schafherde auch grafisch ihr Unwesen. Das sind wohl die »mit den Möglichkeiten der modernen Computergrafik … neu gestalteten« Illusionen, die das Vorwort preist (das Werk ist eine überarbeitete Neuauflage eines vor einigen Jahren im Südwest-Verlag erschienenen Buchs). Da wären die bekannten klassischen Strichzeichnungen der Gestalttheoretiker prägnanter gewesen.

Trotzdem ist Ditzingers Buch ein umfassendes Kompendium optischer Wahrnehmungsillusionen, die der Leser ansonsten nur über diverse Fachbücher verstreut finden würde. Da kann man angesichts der Materialfülle und des günstigen Preises die genannten Mängel wohl verschmerzen.

Rolf Henkel

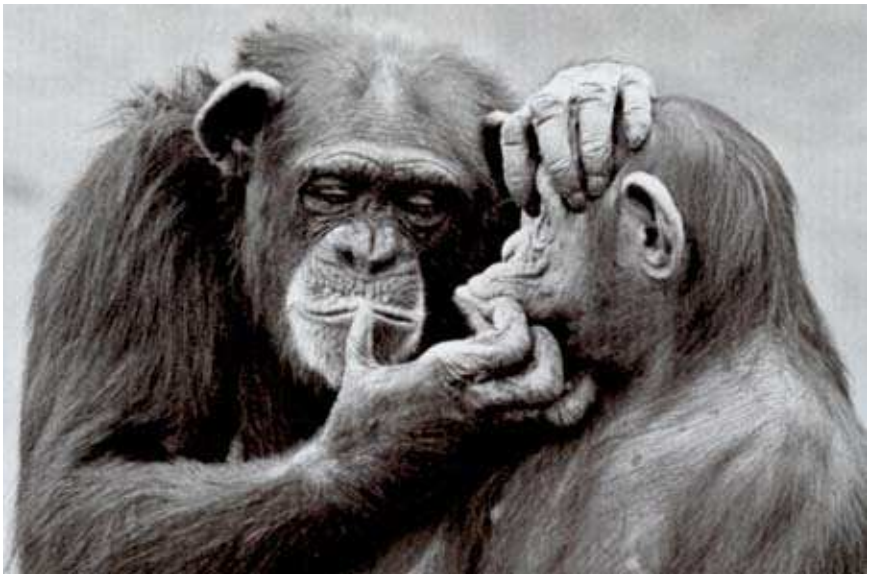
Der Rezensent hat an der Universität Bremen die kohärenzbasierte Theorie des Stereosehens entwickelt. Er ist promovierter Physiker und Direktor für Forschung und Entwicklung der NewSight GmbH Jena, eines Herstellers von 3-D-Displays.

Thomas Ditzinger
Illusionen des Sehens
Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung

Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, München 2006. 250 Seiten, € 25,–

Moral ist keine dürftige Fassade

Wir haben sie schon von unseren stammesgeschichtlichen Vorfahren geerbt – in der hilfreichen wie der rachsüchtigen Variante.



Groomen ist der soziale Klebstoff aller Primatengesellschaften – hier zwischen Schimpansenmutter und -tochter.

Wie du mir, so ich dir«, lautet eine der ältesten Weisheiten der menschlichen Gesellschaft. Doch das Prinzip der Reziprozität, also der positiven wie negativen Vergeltung, ist älter als unsere Art selbst. Diese Meinung vertritt zumindest der prominente Primatologe Frans de Waal. Er sieht Moral als etwas Natürliches, tief Verwurzeltes und stellt sich damit gegen die »Fassadentheorie«, nach der Moral nur eine dünne »kulturelle Tünche« ist, die das ursprüngliche Böse, Instinktive, eben »den Affen in uns«, notdürftig überdeckt.

Entsprechend konzentriert sich seine Beweisführung auf die beiden nächsten Verwandten des Menschen, die Schimpansen und die Bonobos, mit denen der Niederländer seit den 1970er Jahren arbeitet. Anhand zahlreicher Beispiele, teils selbst beobachtet, teils Kollegen zitierend, beschreibt er, wie Kooperation oder gar Tausch von Dienstleistungen, aber auch Rache und Vergeltung bei den beiden Menschenaffenarten funktionieren. Der Schlüssel zu diesem Verhalten sei Empathie: die Fähigkeit, sich in den anderen hineinzuversetzen und so mit ihm mitzuempfinden.

Gleich zu Beginn erzählt de Waal von einem weiblichen Bonobo namens Kuni im Zoo von Twycross (England). Sie half einem leicht verletzten Star wieder auf die Beine, nachdem dieser gegen eine Glasscheibe geflogen war. Das eigentlich Bemerkenswerte ist nicht die Tatsache, dass Kuni sich in den Vogel hineinversetzen konnte und ganz genau wusste, was zu tun ist, sondern dass sich ihre Hilfe an eine fremde Spezies richtete, die in freier Wildbahn sogar in die Kategorie »Mittagsimbiss« gefallen wäre. Kunis Verhalten hatte also keinerlei Vorteile für sie selbst. Dieses so genannte zielgerichtete Helfen, wozu auch das Trösten zählt, ist laut de Waal äußerst selten in der Tierwelt, wenn auch typisch für Menschenaffen.

Interessanterweise entwickelt sich bei Menschenkindern die Fähigkeit zu trösten zur gleichen Zeit wie jene, sich selbst im Spiegel zu erkennen, nämlich im zweiten Lebensjahr. Die Beweise verdichten sich, dass Selbsterkenntnis die Voraussetzung für Mitgefühl ist – und in dem Moment ihres Erwachens der Grundstein für Moral gelegt wird. De Waal sieht eine evolutionäre Kontinuität zwischen sozialen Einzelakten wie Trösten, Helfen und Teilen, die Bonobos und Schimpansen beherrschen, und den komplexen moralischen Prinzipien der Menschen. Im Übrigen war schon Charles Darwin der Ansicht, dass die Moral aus sozialen Instinkten geboren wurde, wie de Waal bemerkt.

Die Fähigkeit zum Hineinversetzen in den anderen macht auch die Reziprozität möglich. De Waal konnte durch seine Forschungen am Yerkes-Primatenzentrum in Atlanta statistisch nachweisen, dass Schimpansen mit Dienstleistungen handeln: Sie merken sich über einen längeren Zeitraum, wer ihnen wann bei der Fellpflege geholfen hat (Spektrum der Wissenschaft 6/2006, S. 50). Freundliche Helfer belohnen sie später mit einer Gegenleistung, etwa indem sie ihnen großzügiger Futter abgeben als anderen.

Die Kehrseite dieser Freundschaftsdienste sind Rache und Bestrafung. De Waal berichtet von Bonobos im Zoo von Arnhem (Niederlande), die Gruppenangehörige für Missetaten bestrafen. So wurden zwei Bonoboweibchen fürs Herumtrödeln gemaßregelt, das die Fütterungszeit erheblich nach hinten verschob und so eine negative Konsequenz für die gesamte Gruppe hatte. Ebenso erzählt er von zwei Schimpansen, die sich zusammentaten, um in einem Racheakt das Alphamännchen zu Tode zu prügeln. Ganz wie in der menschlichen Gesellschaft scheint das Zusammenspiel von positiver und negativer Vergeltung die hierarchisch organisierte Gruppe der Menschenaffen im Gleichgewicht zu halten.

Dennoch: In Bezug auf Tiere wie Schimpansen oder Bonobos von »Hass« zu sprechen, wie der Autor es einmal tut, ist wissenschaftlich sehr gewagt. Schließlich ist selbst beim Menschen nicht klar, wie und warum diese Gefühlsregung entsteht und wie sie überhaupt zu definieren ist. Auch überträgt de Waal bisweilen allzu schnell die sozialen Verhaltensmuster der Menschenaffen auf die Strukturen der menschlichen Gesellschaft. Trotzdem ist es ein interessanter Ansatz, den Menschen als eine Mischung aus dem friedfertigen, hedonistischen Bonobo und dem aggressiven, machthungrigen Schimpansen zu sehen. Wie eng die drei Primatenarten tatsächlich miteinander verwandt sind, müssen Verhaltens- und Evolutionsforschung in Zukunft noch zeigen.

Typisch für Populärwissenschaftliches aus Amerika, ist das Buch locker geschrieben und entsprechend leicht verständlich. Zugleich ist es ein sehr persönliches Buch: ▷

▷ Wenn de Waal die Bonobos, im Gegensatz zu den aggressiveren Schimpansen, als »Hippies der Primatenwelt« bezeichnet, ist zu spüren, wie sehr er an das Gute in ihnen glaubt – und damit auch im Menschen. Es ist kein stringenter Forschungsbericht, sondern eine Ansammlung einzelner Episoden aus dem Affenalltag – einige nur amüsant, andere hochgradig spannend. Man mag ihm einen Mangel an wissenschaftlicher Distanz vorwerfen, doch seine Thesen beruhen allesamt auf knapp vierzig Jahren aufmerksamer Beobachtung – und einem umfangreichen Literaturstudium. Und sie regen zumindest an, einmal genauer über die menschliche Natur nachzudenken.

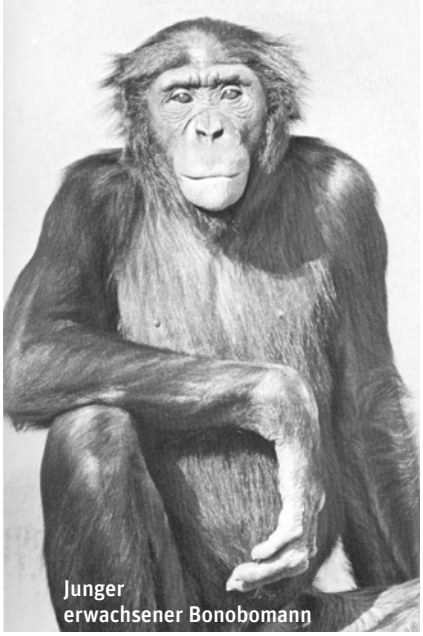
So sind es für Frans de Waal am Ende »zwei Affen in uns«, die das menschliche Verhalten prägen: der Bonobo als der gute Dr. Jekyll und der Schimpanse als der böse Mr. Hyde.

Rosa Vollmer

Die Rezensentin ist Diplombiologin und arbeitet als freie Journalistin in Mainz.

Frans de Waal
Der Affe in uns
Warum wir sind, wie wir sind

Aus dem Amerikanischen von Hartmut Schickert. Hanser, München 2006.
368 Seiten, € 24,90



Junger erwachsener Bonobomann

MEDIZIN

Die unerträgliche Schwierigkeit des langen Seins

Alt werden ist an sich schon unangenehm. Warum muss uns dieser Professor auch noch ein schlechtes Gewissen dabei bereiten?

Christoph Bamberger ist der erste deutsche Anti-Aging-Professor, mit der offiziellen Bezeichnung Professor für Endokrinologie und Stoffwechsel des Alterns am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf. Außerdem ist er Direktor des dortigen Medizinischen PräventionsCentrums (MPCH), an dem Patienten sich auf Herz und Nieren untersuchen und beraten lassen können.

Ohne Zweifel verfolgt er seine beruflichen Ziele mit dem gebührenden Ernst; das geht auch aus jeder Seite seines Buchs hervor. Mit Inbrunst klärt er uns auf, »warum und wie wir aktiv Prävention betreiben sollten, statt uns auf die Seite der ohnehin schon mächtigen Armee von Zellaggressoren zu stellen und unseren Körper noch mit weiteren Giften zu belasten«. Alles andere wäre »damit vergleichbar, einem Stürzenden auch noch einen Tritt zu versetzen, statt ihn sanft aufzufangen«. Die Hinauszögerung des Todes ist wahrlich kein Spaß.

Im ersten Teil des Buchs beschreibt Bamberger verschiedene Theorien des Alterns: Wir werden runzlig und gebrechlich, unter anderem weil

- es in unseren Genen angelegt ist,
- die Zellen des Körpers einem permanenten Bombardement aus schädigenden Substanzen und Strahlen ausgesetzt sind,
- die Hormonproduktion nachlässt.

Da man gegen seine Gene und die allgegenwärtigen freien Radikale kaum etwas tun kann, bleibt als einzig konkrete Folgerung aus all den schönen Theorien die Empfehlung, Hormone zu schlucken.

Im nächsten Teil bewertet Bamberger sämtliche Präventionsmaßnahmen von Vitaminen bis zu Impfungen.

Im dritten und letzten Teil erläutert er sein Programm, das er in vier »Module« eingeteilt hat. Enthält Modul 1 »Vorsorge und Früherkennung« noch recht einfache und leicht einzusehende Tipps wie die Durchführung regelmäßiger Vorsorgeuntersuchungen, begegnet man bei Modul 2 »Lebensstiloptimierung« all den üblichen Verdächtigen wie Ernährung, Bewegung und Rauchen wieder und wird richtig in die Pflicht genommen.

Dagegen bietet Modul 3 »Medikamente und Hormone« einige Überraschungen. Sollen die Männer Testosteron und die Frauen Östrogen einnehmen, um das Nachlassen der natürlichen Produktion und die zugehörigen Wechseljahresbeschwerden zu kompensieren? Bamberger empfiehlt es. Zwar nicht immer und im Allgemeinen, aber immerhin. Das Vorgehen ist umstritten, da nach dem Ergebnis einiger Studien die Östrogentherapie das Risiko für Brustkrebs und andere Krebsarten sowie für Herzinfarkt und Schlaganfall erhöht. Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) rät inzwischen, die Hormonersatztherapie nur noch bei ausgeprägten Wechseljahresbeschwerden und für einen überschaubaren Zeitraum anzuwenden.

Abschließend gibt Bamberger in Modul 4 »Philosophie der zweiten Lebenshälfte« Tipps für ein erfülltes Leben im Alter. Wir sollen unser Selbstbewusstsein festigen, unsere Erwartungen an die eigenen Möglichkeiten anpassen und lernen, mit Stress umzugehen. Außerdem sollen wir uns Zeit für die eigenen Interessen nehmen und unsere sozialen Bindungen pflegen.

Ergänzt wird das Ganze durch den »Präventionsnavigator Vorsorge und Früherkennung«. Hier listet der Autor für jede Altersklasse ab 30 die anstehenden medizinischen Untersuchungen auf. Wer jetzt noch Lust hat, kann am Ende des Buchs den Test zur Ermittlung des biologischen Alters und der wahrscheinlichen persönlichen Lebenserwartung machen.

Das ist alles gut und richtig, auch der häufig wiederholte Appell an die Eigenverantwortung; aber wirklich neu ist es nicht. Einzelne Punkte werden auch angefochten. Der amerikanische Soziologe Barry Glassner nimmt in seinem neuen Buch »The Gospel of Food: Everything You Think You Know about Food Is Wrong« die moderne Selbstkasteiung kritisch unter die Lupe. Die meisten Änderungen der Ernährung und des Lebensstils – Ausnahme: das Rauchen aufgeben – hätten nur kleine und uneinheitliche Effekte: Was dem einen schadet, könne der andere ungestraft genießen. Und außerdem gebe es neben der Ernährung eine Fülle von Risikofaktoren für typische Alterskrankheiten wie Herzinfarkt und Krebs: vi-

rale und bakterielle Infektionen, Stress im Beruf sowie frühe Defizite wie Unterernährung, niedriges Geburtsgewicht und mangelnde Unterstützung der Eltern. Das Altern scheint also ein viel zu komplexer Prozess zu sein, als dass einzelne Maßnahmen eine spürbare Wirkung haben könnten.

Das wesentliche Problem dieses Ratgebers ist nicht sein Inhalt, sondern der tierische Ernst, mit dem Bamberger seine gute Botschaft anbringt. Ein wenig Leichtigkeit, etwas Humor oder augenzwinkernde Kommentare hätten einem so schweren Thema wie der Hinauszögerung des Todes vielleicht etwas von seinem Schrecken nehmen können.

Mit vorwurfsvollen Formulierungen und der ständig wiederholten Aufforderung »Sie sollten …« führt er mir meine eigene Unzulänglichkeit drastisch vor Augen. »Was spricht denn dafür, eine Verhaltensweise auch nur einen Tag lang fortzusetzen, wenn man deren gesundheitsschädliche Wirkung rational und emotional verstanden hat?« Nichts. Das hat der Autor bereits erkannt, und ich erkenne es jetzt auch. Ein schlechtes Gewissen und Minderwertigkeitsgefühle stellen sich ein. Dann verspricht uns Bamberger auch noch, dass »zehn gesunde Jahre mehr« machbar seien und »ein für alle gangbarer Weg«. Ich fühle mich unfähig. »Wenn es so einfach ist, warum kann ich es dann nicht, was hindert mich daran?«, frage ich mich entsetzt.

Falls es Ihnen auch so gehen sollte, hilft die bewährte Freud'sche Verdrängung: Legen Sie das Buch einfach weg. Und genießen Sie Ihr Leben.

Anke Römer

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und Wissenschaftsjournalistin in Mannheim.

Christoph M. Bamberger
Besser leben, länger leben
Zehn gesunde Jahre mehr sind machbar – das individuelle Präventionsprogramm
Knaur, München 2006. 256 Seiten, € 19,95

RELIGION UND WISSENSCHAFT I

Eine stilistisch amüsante Kampfschrift

Reiche der Religion den kleinen Finger, und sie verschlingt dich mit Haut und Haaren – so hätte es jedenfalls Ulrich Lüke am liebsten.

Dem treuen Spektrum-Leser ist der Theologe Ulrich Lüke kein Unbekannter. Im Streitgespräch mit dem Philosophen Bernulf Kanitscheider verteidigte er den Anspruch der Religion auf eine Wahrheit jenseits der empirischen Naturforschung (Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 82). Nun legt er einen breit angelegten Essay vor, der schon im Titel den Anspruch verkündet, biologisch-anthropologisches Wissen mit religiöser Offenbarung zu vereinen.

Um dieses Ziel zu erreichen, stellt Lüke den zeitgenössischen Kenntnisstand über die Evolution des Menschen so dar, als müsste jeder unvoreingenommene Betrachter ganz von selbst zu dem Schluss kommen, hier sei etwas Höheres im Spiel als bloß naturgeschichtliche Menschwerdung. Mit recht giftiger Polemik baut Lüke den Popanz eines Naturalismus auf, den er auf reduktionistischen Plattfüßen ideologisch blind durchs gesamte Buch stolpern lässt. Wer als Anthropologe keinen Anlass findet, in frühen kultischen Artefakten mehr zu sehen als den verständlichen Wunsch nach Jagderfolg, reicher Ernte und langem Leben, den vergleicht Lüke mit einem Gehörlosen, der Notenschrift mit Musik verwechselt. An anderer Stelle kommt ihm so ein dummer Naturalist vor wie jemand, der einen Zehn-Euro-Schein als bedrucktes Papier analysiert, ohne dessen Tauschwert zu erkennen.

Die schiefen Vergleiche werden zwar dem ergebnisoffenen Wesen der wissenschaftlichen Methode kaum gerecht, wirken aber in unserer zutiefst christlich geprägten Kultur dennoch suggestiv. Ist es nicht ein ganz natürlicher Wunsch, das religiöse Gedankengut, mit dem wir alle aufgewachsen sind, irgendwie in später erworbenes Wissen zu integrieren? Wer wirft schon gern einen Teil seiner Biografie über Bord? Versöhnen von Glauben und Wissen – für viele ein schönes Ziel. Nur leidet eine etwaige Bereitschaft zur friedlichen Koexistenz unter Lükes eifernder Parteinahme.

Die konfliktreiche Geschichte von Religion und Naturforschung erzählt Lüke als idyllischen Bildungsroman – man rate, wer hier von wem lernt –, in dessen Verlauf die Wissenschaft als treue Magd der Religion erwachsen wurde. So behauptet er, »die biblischen Texte …« hätten »… über Jahrhunderte hinweg als eine Art von Propädeutikum für den Evolutionsgedanken gewirkt«. Über peinliche Tatsachen wie das tragische Schicksal des Priesters und Evolutionsforschers Teilhard de Chardin (1881–1955), den die Kirche wegen seiner unorthodoxen Ansichten faktisch mundtot gemacht hatte, tänzelt Lüke elegant hinweg; wer darüber die ganze Wahrheit erfahren möchte, muss »Der Anfang aller Dinge« von Hans Küng lesen – auch ein Versöhnungsbuch, aber ehrlicher.

Sodann wirft sich Lüke, wie seine Kirche ihm vorschreibt, in Fragen der Stammzellforschung und der Abtreibung als apodiktischer Schützer jeder befruchteten Eizelle in die Bresche, erwähnt aber mit keinem Wort den Skandal des päpstlichen Kondom- und Pillenverbots, das vor allem in den armen Ländern für namenloses Elend sorgt – Stichwort Frauen als Gebärmaschinen, Stichwort Aids-Ansteckung.

Schließlich nimmt Lüke noch ausführlich Stellung zu der inzwischen wieder etwas abgeflauten Debatte der Hirnforscher um Bewusstsein und Willensfreiheit, die freilich durch seine Vorliebe für unübersichtliche Diagramme nicht einfacher wird. Immerhin wirkt die Darstellung hier entspannter, weil noch so viele Fragen offen sind und von vornherein genügend Platz für theologische Spekulation bleibt.

Alles in allem eine einseitige, dabei stilistisch oft amüsante Kampfschrift. Für Versöhnungsbereite enthält das Buch eine implizite Warnung: Reiche der Religion den kleinen Finger, und sie verschlingt dich mit Haut und Haaren. Sie duldet nichts neben sich, aber unter ihrem schweren Mantel macht sie der Wissenschaft gerne Platz.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Ulrich Lüke
Das Säugetier von Gottes Gnaden
Evolution, Bewusstsein, Freiheit
Herder, Freiburg 2006. 336 Seiten, € 19,90

RELIGION UND WISSENSCHAFT II

Eine glänzende Widerlegung des Intelligent Design

Christopher Schrader plädiert für eine friedliche Koexistenz von Religion und Wissenschaft – ohne dass die eine die andere vereinnahmt.

Das schmale Büchlein setzt sich informativ und elegant mit dem »Intelligent Design« auseinander. Diese vor allem in den USA – aber nicht nur dort – grassierende Doktrin behauptet, die von Darwin begründete Evolutionslehre sei falsch; unmöglich könne die Vielfalt der lebenden Organismen durch bloß natürliche Vorgänge entstanden sein. Vielmehr müsse dabei ein »intelligenter Designer« seine Hand im Spiel gehabt haben – modischer Deckname für den biblischen Schöpfergott.

In der Tat leuchtet der Evolutionsgedanke nicht unmittelbar ein und wird darum Umfragen zufolge noch heutzutage von einer stabilen Mehrheit bezweifelt oder abgelehnt. Ist es nicht unglaublich, dass ein so komplexes Instrument wie das Auge ohne Absicht, nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum, bloß durch das blinde Wechselspiel von Mutation und Selektion entstanden sein soll? Saurier, die ausgestorbenen Schreckensgestalten, sollen die evolutionären Vorläufer der Vögel gewesen sein, unserer gefiederten, singenden Freunde? Und wir Menschen seien eng mit jenen haarigen Baumkletterern verwandt, die wir beim Zoobesuch im Affenhaus amüsiert und etwas verlegen betrachten?

Alles Humbug, erwidern die Vertreter des Intelligent Design und verkünden eine beruhigende Botschaft: Es sei nicht nur einfacher, sondern auch wahrer, dem altbekannten Buchstaben der biblischen Schöpfungsgeschichte zu folgen als den schwer verdaulichen Aussagen der Evolutionsforschung.

Christopher Schrader, Redakteur bei der »Süddeutschen Zeitung«, bringt das Kunststück zu Wege, so kurzweilig wie gründlich einen knappen Aufriss der Evolutionslehre und des Intelligent Design zu liefern. Er gibt die Argumente beider Seiten wieder, skizziert eine kurze Geschichte der Auseinandersetzungen und bewertet die Resultate. Er erklärt Intelligent Design als ein Phänomen, das aus dem Milieu des christlichen Fundamentalismus in den USA hervorgegangen ist, erwähnt aber ähnliche Tendenzen in der katholischen Kirche von heute. Die Position des derzeitigen Papstes zum Verhältnis von Schöpfung und Evolution erscheint dem Autor noch uneindeutig.

Schrader selbst favorisiert einerseits eine Haltung, die den überwältigenden Indizien für eine rein natürliche Entwicklung des Lebens uneingeschränkt Rechnung trägt; insofern ist sein Büchlein in dieser Kürze die glänzendste Widerlegung des Intelligent Design, die es derzeit zu kaufen gibt. Andererseits ist die Schrift in einem auf religiöse Themen spezialisierten Verlag erschienen und plädiert für ein Ende des Streits zwischen Religion und Wissenschaft, für ein friedliches Miteinander von Glauben und Naturforschung.

Schrader erwähnt gegen Ende einige prominente Biologen, die sich zum Christentum bekennen, lässt aber auch nicht unerwähnt, dass – beginnend mit Darwin selbst – wichtige Vertreter der Evolutionsforschung überzeugte Atheisten gewesen sind. Auch hierin ist das kleine Buch angenehm fair und, da es nirgends versucht, die Wissenschaft dem Glauben zuliebe zurechtzubiegen, sehr zu empfehlen.

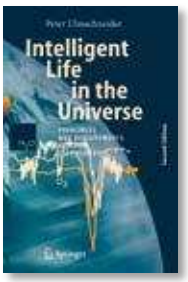
Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Christopher Schrader
Darwins Werk und Gottes Beitrag
Evolutionstheorie und Intelligent Design
Kreuz, Stuttgart 2007. 137 Seiten, € 12,95

EXOBIOLOGIE

Fürsorgliche Superzivilisationen



Warum haben uns die Außerirdischen noch nicht besucht? Um uns vor dem Kulturschock zu bewahren!

Anfang dieses Jahres veranstaltete das britische Wissenschaftsmagazin »New Scientist« einen amüsanten Wettbewerb. Die Leser sollten eine SMS-artige Botschaft von maximal 160 Zeichen entwerfen, die ein Außerirdischer kurz nach seiner Landung auf der Erde nach Hause schicken würde.

Viele Zuschriften gaben der Meinung Ausdruck, dass die Aliens nicht sonderlich beeindruckt wären: »Kein intelligentes Leben gefunden« oder »Thermostat kaputt« waren noch freundliche Kommentare. Am besten gefielen mir aber folgende Einsendungen:

»Auslöschung unnötig, sie machen es selbst. Strahlungspegel steigt angenehm, Chancen für kräftige Steigerung positiv. Es ist warm, steigend. Kommt bald.«

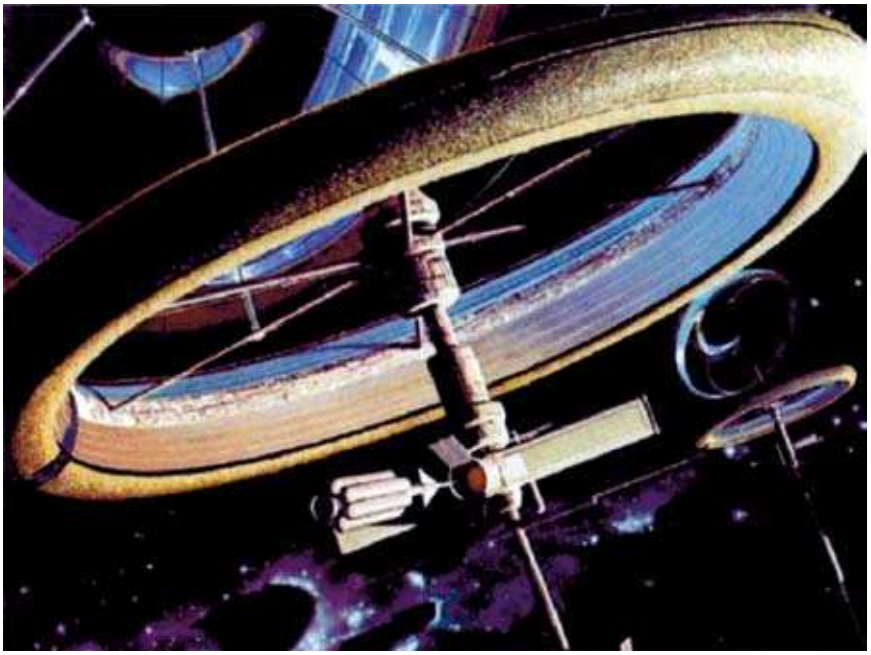
»Parallele Evolution von Intelligenz. Eine auf Kohlenstoff-, die andere auf Siliziumbasis. Kohlenstoffform ist von der Siliziumform domestiziert, um sie mit dem Nötigen zu versorgen.«

»Argh. Dominante Spezies ›Autos‹. Bunte Exoskelette und bizarre Reproduktion mit Hilfe zweibeiniger Sklavenspezies. Aggressiv, aber vorhersagbar. Intelligenz unklar.«

Es gibt nicht wenige Forscher, gerade in der Astronomie, die solche Witze noch für das Beste halten, was man über Außerirdische oder die Suche nach ihnen, Seti *(search for extraterrestrial intelligence)* genannt, sagen sollte. Jede Unterstützung von Suchprogrammen etwa mit Radioteleskopen halten sie für Geldverschwendung. So groß und unüberbrückbar seien die kosmischen Distanzen und Zeitspannen, dass jede Suchaktion oder gar eine Reise durchs Weltall von vornherein zum Scheitern verurteilt sei.

Die Alien-Scherze legen das Dilemma aller Seti-Forschung bloß, wonach wir eben nur ein Beispiel für Leben kennen, die Erde – mit allen Fußangeln anthropozentrischer Sichtweisen. Der Fluch für die Wissenschaft ist es allemal, von diesem einen Beispiel auf den Rest des Kosmos schließen zu müssen.

Freundlicher gesinnte Forscher wie der Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954) fragten daher schon vor einem halben Jahr-



Mit dem Fahrrad ins Weltall? Nein, eine Raumstation in einem fast fünfzig Jahre alten Entwurf. Im Inneren des luftgefüllten, rotierenden Torus (Speichenlänge 10 Kilometer, Umfangsgeschwindigkeit 1100 Kilometer pro Stunde) herrscht die gewohnte »Schwerkraft«.

hundert skeptisch: »Wenn es sie gibt, warum sind sie dann noch nicht hier gewesen?« Dem stellte der britische Astronomer Royal, Martin Rees, entgegen: »Abwesenheit von Evidenz ist nicht Evidenz für Abwesenheit.« Und mehrere Millionen Teilnehmer an dem Projekt seti@home (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109), bei dem jeder zu Hause mit seinem PC Signalaufzeichnungen von Radioteleskopen durchforsten helfen kann, halten sich an die Einsicht: Wer nicht sucht, wird mit Sicherheit auch niemals etwas entdecken.

Wer sich einmal auf das Thema Außerirdische Intelligenz eingelassen hat, den lässt es anscheinend nicht mehr los; mich zum Beispiel. Seit Jahrzehnten fasziniert mich zweierlei: die Interdisziplinarität des Themas – fast alle Natur- und Geisteswissenschaften haben etwas zum Alien-Problem beizutragen – und natürlich die Frage: Haben wir wirklich Aussichten, herauszubekommen, ob wir allein im All sind?

Sciencefiction-Autoren sind da längst weiter, der Kontakt mit Außerirdischen ist in ihren Romanen alltäglich. Auch mancher Wissenschaftler, wie etwa Carl Sagan, hat sich dem Genre genähert und spannende Weltraumreißer verfasst, die sogar verfilmt wurden. Ein Glück aber, dass sich, wie Sagan, immer wieder seriöse Forscher mit Seti befassen. Peter Ulmschneider ist ein weiteres Beispiel. Der Heidelberger Astrophysiker hat sein Buch »Intelligent Life in the Universe« gegenüber der Erstausgabe von 2003 deutlich aktualisiert, ein Zeichen dafür, wie rasch sich dieses Gebiet entwickelt.

Das Werk wendet sich an einen akademisch trainierten Leser und gerät teilweise auf das Niveau eines Fachbuchs, soweit das in dieser fast enzyklopädischen Themenbreite möglich ist. Es bietet andererseits auch einen exzellenten Überblick, von der Stern- und Planetenentstehung bis hin zur biologischen Evolution. Aber was mich am meisten interessierte, waren die letzten drei Kapitel, in denen der Autor sich – durchaus spekulativ und kaum risikoscheu – über die Evolution, die Zukunft der Menschheit und außerirdische Zivilisationen seine Gedanken macht.

Ulmschneider glaubt fest an die Existenz außerirdischen Lebens. »Obwohl wir Leben nur von der Erde her kennen, ist es zweifellos hier und anderswo entstanden«, bekennt er auf Seite 3 und reiht sich damit unter die Weltraumoptimisten ein. Diese sehen, wie er, nicht nur unser Sonnensystem als zukünftiges Siedlungsterrain der Menschheit, sondern auch die Milchstraße und andere Galaxien gefüllt mit Leben aller Art, das höchstwahrscheinlich auch noch reichlich erdähnlich aussieht.

Das liegt auch an Ulmschneiders besonderer Sicht der Evolution. Er glaubt nicht nur mit dem Biochemiker Christian de Duve, dass die Entstehung des Lebens ein wahrscheinliches Ereignis sei, sondern im Gegensatz zu prominenten Evolutionstheoretikern wie Ernst Mayr oder Steven Jay Gould auch, dass die Evolution eine Richtung habe. Ein Beleg dafür sei die so genannte Konvergenz: Lebewesen gänzlich verschiedener Abstammung entwickeln höchst ähnliche Merkmale. Beispiele sind die Augen von Säugetieren und Tintenfischen sowie die hohe Intelligenz bei Rabenvögeln und Primaten. Vor allem der Weg zur Intelligenz sei fast unausweichlich, auch auf anderen erdähnlichen Planeten. Dieser Meinung wird vermutlich nicht jeder Evolutionstheoretiker beipflichten.

Doch auch wo sich der Astrophysiker mit Meinungen hinauswagt, bleibt er immer kundig und anregend. Er denkt sogar über intelligente Zivilisationen nach, die es geschafft haben, Milliarden Jahre älter als die Menschheit zu werden. Auf Fermis Frage, warum sie noch nicht hier waren, antwortet man in Seti-Kreisen gerne mit der »Zoohypothese«, die einst von Carl Sagan propagiert wurde: Diese Superzivilisationen vermeiden bewusst jeden Kontakt mit uns. Warum? Alles nur Fürsorge! Denn eine Konfrontation mit einer derart überlegenen Spezies würde – man denke an Columbus, Cortez und die Uramerikaner – doch unweigerlich in Kulturschock und Katastrophe münden.

»Wir könnten niemals wieder unserem eigenen Schicksal folgen«, fürchtet Ulmschneider. Und so unverantwortlich würden sich Außerirdische niemals aufführen, sonst hätten sie selbst nicht so lange überlebt. Und wenn wir uns eines fernen Tages zur Superzivilisation gemausert haben sollten, dann würden wir uns ebenfalls an diesen Kodex halten, schon aus Selbsterhaltungstrieb.

Ulmschneiders Buch führt den Leser in großer Breite und Tiefe an die aktuelle Forschung heran und regt zugleich zum eigenen Nachdenken über die Außerirdischen an.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist habilitierter Physiker und Chefredakteur von Spektrum der Wissenschaft.

Peter Ulmschneider

Intelligent Life in the Universe

Principles and Requirements behind its Emergence

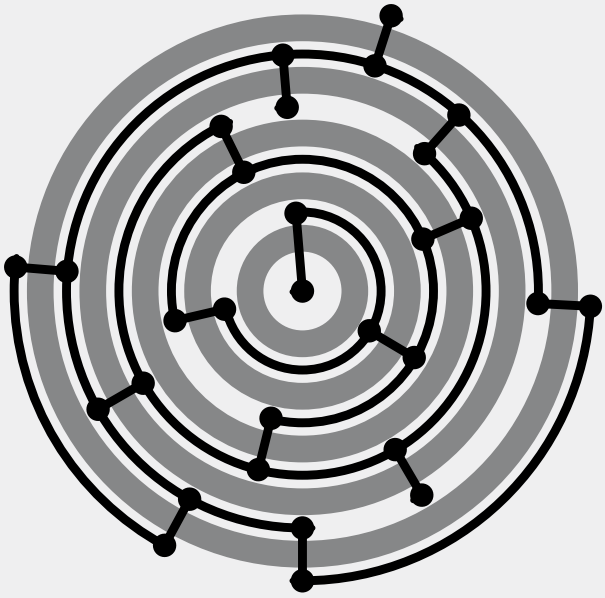
2. Auflage, Springer, Heidelberg 2006. 310 Seiten, € 74,85

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Die Könige von Pontomanien

Von Paul von der Heyde



Die Könige von Pontomanien leiden unter ständiger Furcht vor ihren Feinden. Der innerste Graben um die Stammburg im Zentrum mit Brücke und Wehrburg wurde von Phobias I. angelegt. Von ihm stammt das Gesetz, nach dem jeder Thronfolger einen weiteren Graben mit einer Brücke mehr als sein Vorgänger zu bauen hat. Jede Brücke ist mit zwei Wehrburgen zu versehen, und jede Burg muss über mindestens eine der Heerstraßen vom Zentrum aus erreichbar sein.

Der Plan zeigt Pontomanien zur Zeit von Phobias V. Er erließ das Gesetz, wonach jeder König nach Abschluss der Bauarbeiten ständig unterwegs sein muss, um täglich eine der Burgen zu inspizieren. An jedem Tag reist er von einer Burg zu einer benachbarten, das heißt, auf dem Weg dorthin liegt keine weitere Burg. Stehen zwei oder drei Burgen zur Wahl, wird das Ziel des Tages durch den Wurf eines (idealen) Würfels entschieden. Auch in der Stammburg hält sich der König nur am letzten Tag einer Inspektionsreise auf, schon am nächsten Tag beginnt er eine neue Reise. Einer der Nachfolger von Phobias V. residierte auf seinen Inspektionsreisen durchschnittlich jeden 730. Tag im Stammschloss und verließ pro Reise durchschnittlich 388 Burgen nicht auf derselben Heerstraße, auf der er angereist war. Beides entsprach exakt den statistisch zu erwartenden Werten.

Der wievielte Phobias erfüllte so exakt die statistische Erwartung?

Schicken Sie Ihre Lösung mit der Post an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zum Abschied etwas Edles: einen **»Official Cosmonauts Chronograph« von Fortis** (empfohlener Verkaufspreis 1540 €). Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 12. 06. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Die Hydrazinthe« (April 2007)

Petra wurde heute 56 Jahre alt. Bei einer voll regenerierten Hydrazinthe trägt jeder der S Stiele eine der B Blüten oder eine der V Verzweigungen, also gilt $S = V + B$. Mit Ausnahme des Hauptastes sind alle Stiele paarweise an einer Verzweigung angewachsen, also gilt $S = 2V + 1$. Durch Eliminierung von V aus den Gleichungen folgt

(1) $\quad S = 2B - 1$.

Eine regenerierte Pflanze mit B Blüten besitzt also $2B - 1$ Stiele.

Von den sieben Stielen, die Peter gestern durchtrennte, müssen nicht alle Stümpfe an der Pflanze zurückgeblieben sein, denn er konnte ja später noch einen Stiel samt Stumpf abschneiden. Nehmen wir an, dass n Stümpfe an der Pflanze verblieben und die restlichen $7-n$ in den Strauß gerieten, zusammen mit a abgeschnittenen Blüten. Dann hat sich die Blütenzahl im Strauß durch Nachwachsen von gestern auf heute um $2\cdot(7-n)$ vermehrt. Für Petras Alter p gilt also

(2) $\quad p = a + 2\cdot(7-n)$.

Besaß die Pflanze ursprünglich b Blüten, so hat sie heute a abgeschnittene weniger und $2n$ nachgewachsene mehr, also $b - a + 2n$ Blüten. Laut Aufgabentext ist dies gleich $b/3$, daher gilt

(3) $\quad b - a + 2n = b/3$.

Nach (1) besaß die Pflanze gestern noch $2b-1$ Stiele. Wieder regeneriert, hat sie heute aus dem gleichen Grund bei $b/3$ Blüten $2\cdot(b/3)-1$ Stiele. Laut Aufgabentext sind dies 32,8 Prozent von $2b-1$, also

(4) $\quad 2\cdot(b/3)-1 = 0{,}328\cdot(2b-1)$.

Aus der letzten Gleichung erhält man $b = 63$. Gleichung (3) lautet damit $63 - a + 2n = 21$ oder auch $a - 2n = 42$, und aus (2) erhält man schließlich

$$p = a + 14 - 2n = 14 + 42 = 56.$$

Übrigens werden wir die Anzahl a der von Peter abgeschnittenen Blüten nie erfahren. Wegen $a - 2n = 42$ und $1 \le n \le 7$ ist sie eine gerade Zahl zwischen 44 und 56. Da die Lösung nicht von n abhängt, macht man keinen wesentlichen Fehler, wenn man einfach mit $n = 7$ rechnet.

Die Gewinner der beiden Zauberwürfel »Spektrum Cube« sind Andreas Leonhardt, Burgthann, und Reinhold Müller, Leipzig.

Mit dieser Ausgabe wird unsere Preisrätselrubrik eingestellt. In den nächsten beiden Heften erscheinen noch die Lösungen der Rätsel aus der Mai- und der Juniausgabe. Ein Trost für die Knobelfreunde: Die »Mathematische Knobelei« aus unserer Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) wird wie bisher weitergeführt.

LIE-GRUPPEN

Die Zähmung der widerspenstigen E_8

Der heroische Einsatz geballter Supercomputer-Leistung hat Licht in eine der exotischsten mathematischen Strukturen gebracht: die exzeptionelle Lie-Gruppe E_8.

Von Christoph Pöppe

Am 19. März dieses Jahres verkündete die Förderinstitution American Institute of Mathematics einen Durchbruch besonderer Art. Einer weltweit verstreuten Gruppe von 18 Mathematikern ist es gelungen, unter großem Aufwand an Rechnerleistung die Lie-Gruppe E_8 zu entschlüsseln. Das Ergebnis ihrer Arbeit liegt als Datei der Größe 60 Gigabyte (60 Milliarden Byte) vor; mit einer derartigen Menge an Daten könnte man sich die kompletten Sommerferien lang Tag und Nacht mit Musik im MP3-Format berieseln lassen, ohne je ein Stück zu wiederholen.

Ein Supercomputer namens Sage hat insgesamt 77 Stunden gebraucht, um diese Daten zu errechnen. Das wirkt geradezu flott, wenn man das Unternehmen mit dem Humangenomprojekt vergleicht, das wesentlich mehr Rechenzeit in Anspruch genommen hat, um eine viel kleinere Datei zu produzieren: Das gesamte Erbgut des Menschen passt in ein bescheidenes Gigabyte.

Was ist so besonders an der Lie-Gruppe E_8, dass sich die Mathematiker ihretwegen eine solche Mühe geben?

An sich sind Lie-Gruppen Allerweltsobjekte der Mathematik. Ein geläufiges Beispiel ist die Menge aller Drehungen um den Nullpunkt im dreidimensionalen Raum. Jedes Element dieser Menge ist eine umkehrbare Abbildung: Es dreht jeden beliebigen Vektor um eine gewisse Achse mit einem gewissen Winkel, eine Aktion, die man offensichtlich ohne Weiteres rückgängig machen kann. Zwei Drehungen um verschiedene Achsen und Winkel sind dasselbe wie eine Drehung um – im Allgemeinen – eine dritte Achse und einen dritten Winkel.

Diese Eigenschaften machen die genannte Menge der Drehungen zu einer so genannten Gruppe. Das Nichtstun gehört als das neutrale Element e mit zur Gruppe. Die Gruppenoperation, in diesem Fall die Hintereinanderausführung zweier Drehungen, wird in der Regel wie eine Multiplikation notiert. Allerdings ist die Multiplikation im Allgemeinen nicht kommutativ: Es kommt auf die Reihenfolge zweier Drehungen an.

Lie-Gruppe, nach dem norwegischen Mathematiker Sophus Lie (1842–1899), heißt die Drehgruppe darüber hinaus, weil sie eine »kontinuierliche Gruppe« ist – zu jeder Drehung gibt es andere, die sich von ihr beliebig wenig unterscheiden – und man darüber hinaus auf ihr Differenzialrechnung betreiben kann.

E_8 ist nicht wirklich einfach

Die Elemente einer Lie-Gruppe müssen nicht unbedingt Drehungen sein. Andere Kongruenzabbildungen wie Parallelverschiebungen und Spiegelungen sind ebenfalls erlaubt, desgleichen verzerrende Abbildungen, wenn es nur möglich ist, sie rückgängig zu machen. Die abstrakte Definition einer Lie-Gruppe erfordert nur, dass ihre Elemente kontinuierlich variierbar sind, dass das Produkt zweier Elemente wieder zur Gruppe gehört und jedes von ihnen umkehrbar ist.

Das lässt den Mathematikern große Freiheiten bei der Konstruktion:

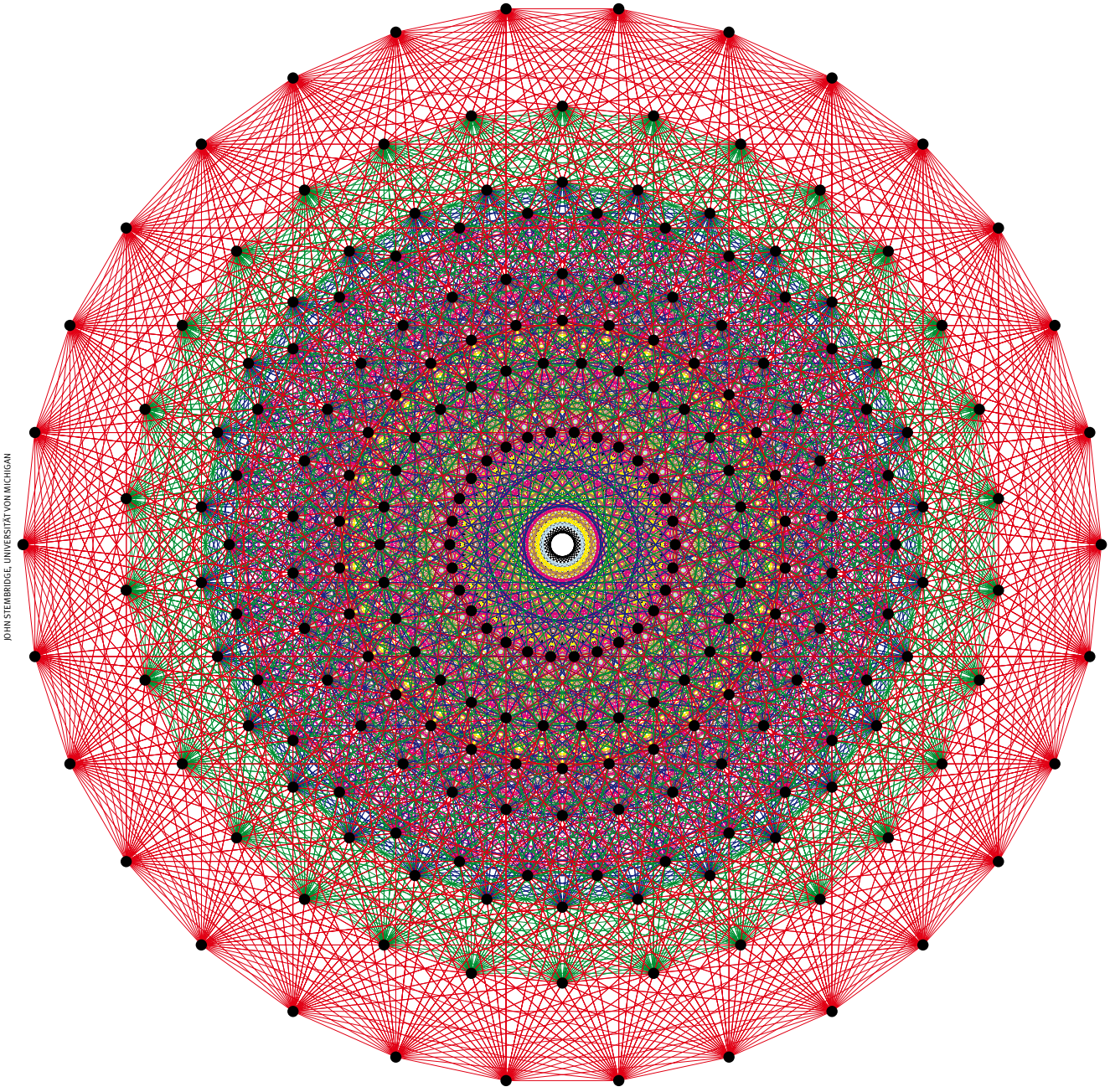
▶ Die Abbildungen, aus denen eine Lie-Gruppe besteht, dürfen statt im gewohnten dreidimensionalen Raum in abstrakten Räumen beliebig hoher Dimension wirken.

▶ Eine bedeutende Klasse von Abbildungen, die insbesondere die Drehungen und Spiegelungen umfasst, sind die linearen Abbildungen. Jede von ihnen ist durch eine Matrix beschreibbar, ein quadratisches Zahlenschema mit so vielen Zeilen und Spalten, wie der zugehörige Raum Dimensionen hat. Man finde – irgendwie – ein algebraisches Gleichungssystem für die Koeffizienten einer solchen Matrix mit der Eigenschaft, dass das Produkt zweier Matrizen, die diese Gleichungen erfüllen, dies ebenfalls tut, und schon hat man eine Lie-Gruppe.

▶ Aus einer Lie-Gruppe und einer ihrer Untergruppen kann man eine neue Lie-Gruppe machen. Sie besteht aus den Elementen der alten Gruppe mit der Maßgabe, dass zwei Elemente als gleich angesehen werden, wenn sie sich nur um ein Element der Untergruppe unterscheiden. Man spricht von der »Quotientengruppe«, weil man in einem gewissen Sinn die Gruppe durch die Untergruppe dividiert hat. Diese Analogie mit der gewöhnlichen Division kann man so weit treiben, dass es so etwas Ähnliches gibt wie die Zerlegung einer Gruppe in »Primfaktoren«: nicht weiter zerlegbare (»einfache«) Teile.

Obendrein werden unter dem Namen E_8 mehrere Gruppen zusammengefasst. Ihnen ist gemeinsam, dass die sie definierenden algebraischen Gleichungssysteme auf dasselbe hinauslaufen, wenn man sie nicht für reelle, sondern für komplexe Zahlen auffasst. Es gibt also mehrere »Formen« der E_8.

Das sieht auf den ersten Blick wie ein undurchdringlicher Dschungel voll exotischer und rätselhafter Biester aus. Aber dank der genannten Zerlegbarkeit



JOHN STEMBRIDGE, UNIVERSITÄT VON MICHIGAN

ist es möglich, etwas Zoologie zu betreiben. Schon Ende des 19. Jahrhunderts gelang es, die einfachen Lie-Gruppen erschöpfend zu klassifizieren: Es gibt vier unendliche Familien, deren Mitglieder mit A_n, B_n, C_n und D_n bezeichnet werden – das n-te Familienmitglied wird aus einer Struktur im n-dimensionalen Raum, dem »maximalen Torus«, konstruiert –, und fünf »Ausnahmeerscheinungen« namens G_2, F_4, E_6, E_7 und E_8. (Bei einer Gruppe wie E_8 ist die Bezeichnung »einfach« allerdings ein grober Euphemismus: Einfach zu verstehen ist sie nun wirklich nicht.)

Unter den »armen Verwandten« der Lie-Gruppen, den diskreten Drehgruppen im n-dimensionalen Raum, verhält es sich in gewisser Weise ganz ähnlich. Ein Beispiel einer diskreten Drehgruppe ist die Menge der Drehungen im dreidimensionalen Raum, welche die Koordinatenachsen aufeinander abbilden; solche Gruppen gibt es in jeder Dimension. Aber im dreidimensionalen Raum gibt es außerdem die Symmetriegruppe des Ikosaeders; das ist die Menge der Abbildungen, welche das regelmäßige Ikosaeder (einen der fünf platonischen Körper) unverändert lassen; und dafür ▷

Die 240 nächsten Nachbarn einer Zentralkugel im achtdimensionalen Raum, herunterprojiziert auf die zweidimensionale Ebene. John Stembridge von der Universität von Michigan in Ann Arbor hat die Projektion so gewählt, dass das Ergebnis maximale Symmetrie hat. Dadurch sortieren sich die 240 Kugelmittelpunkte in acht Ringe zu je dreißig Punkten, und das ganze Bild ist dreißigzählig dreh- sowie spiegelsymmetrisch. Die Linien verbinden jede Kugel mit ihren nächsten Nachbarn; das sind jeweils 56 Stück. Die Farben der Linien wurden zur Verbesserung des Kontrasts gewählt und sind ohne mathematische Bedeutung.

▷ gibt es in höheren Dimensionen kein Gegenstück. Entsprechend existiert die größte exzeptionelle Lie-Gruppe E_8, weil es im achtdimensionalen Raum – und nur dort – eine ganz besondere Menge von Transformationen gibt.

Was macht ausgerechnet die Dimension 8 so bemerkenswert? Eine von mehreren möglichen Erklärungen verläuft über Kugelpackungen: möglichst Platz sparende Anordnungen gleich großer Kugeln im n-dimensionalen Raum.

In zwei Dimensionen passen sechs »Kugeln« (die hier nichts weiter als Kreise sind) um eine Zentralkugel, in drei Dimensionen sind es zwölf, die allerdings nicht so stramm sitzen, wie in zwei Dimensionen die sechs Münzen um die zentrale Münze passen.

Naturgemäß werden die Räume mit zunehmender Dimension immer geräumiger, sodass immer mehr Nachbarn an der Zentralkugel Platz finden. Aber Dimension 8 ist darüber hinaus etwas Besonderes: Man kann 240 Kugeln an die Zentralkugel anlegen; diese Packung ist nicht nur optimal, sondern auch stramm, und sie erlaubt eine Fortsetzung durch Translation in den gesamten Raum, das heißt in acht voneinander unabhängige Richtungen (Bild S. 95). Aus den Vektoren, die vom Mittelpunkt der Zentralkugel auf die anderen Kugelmittelpunkte weisen, den so genannten Wurzelvektoren, lässt sich in mehreren, komplizierten Schritten die Gruppe E_8 konstruieren.

Von Gruppen zu Elementarteilchen

Besser als an den Einzelheiten ihrer Konstruktion erkennt man die Gruppe an ihren Wirkungen: Was stellt sie mit den Punkten ihres Raums an, und wie wirkt das auf Funktionen, die auf diesem Raum definiert sind?

Funktionen auf vieldimensionalen Räumen sind den Quantenphysikern vertraut. Sie beschreiben ein Elementarteilchen durch seine »Wellenfunktion«, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens in Abhängigkeit vom Ort beschreibt. In ihrem Lieblingsobjekt, dem Wasserstoffatom, unterscheiden sich die verschiedenen Serien angeregter Zustände durch ihre Symmetrieeigenschaften: Die der ersten Serie sind kugelsymmetrisch, die anderen haben nur noch geringere Symmetrie, das heißt, es gibt weniger Elemente der Gruppe, unter denen sie unverändert bleiben. Es werden sogar ganze Teilchen mit angeregten Zuständen abstrakter Objekte – zum Beispiel Strings oder Membranen – identifiziert und diese wiederum mit gewissen Merkmalen einer Symmetriegruppe, den »irreduziblen Darstellungen«. Genauer: Die irreduziblen Darstellungen der Gruppe »Bewegungen der Raumzeit« entsprechen den prinzipiell möglichen Typen von Elementarteilchen.

Hier setzen die Bemühungen der 18-köpfigen Mathematikergruppe an. Ihr Projekt namens »Atlas« hat sich zum Ziel gesetzt, die Beziehungen unter den irreduziblen Darstellungen einer Vielzahl von Lie-Gruppen zu kartieren. Nur bei der exotischsten Gruppe E_8 und auch dort nur bei ihrer widerspenstigsten Form, der »split-real form«, gerieten die Mathematiker an die Grenzen der Computerkapazität.

Nachdem sie das Problem so weit wie überhaupt möglich in kleinere Teile zerlegt hatten, blieb als größter Teil die Aufgabe übrig, eine Tabelle mit 453 060 Zeilen und ebenso vielen Spalten zu füllen. Da ist es nur ein schwacher Trost, dass man von ihren Einträgen nur die Hälfte berechnen muss. Es bleiben ungefähr 100 Milliarden Tabelleneinträge. Jeder von ihnen ist ein Polynom, zu beschreiben durch ein paar ganze Zahlen, von denen allerdings weder die Anzahl noch die Größenordnung sonderlich gut bekannt waren.

Das stellte die Computeranwender vor einzigartige Schwierigkeiten. Praktisch jede Zwischengröße, mit der man rechnet, hat mit jeder anderen zu tun. Das Problem ist nicht in Teilprobleme zerlegbar, deren jedes nur mit einem bescheidenen Teil der Daten arbeiten würde. Der Computer musste also das komplette Material »im Kopf«, sprich im Arbeitsspeicher, haben. Hätte er sich seine Daten von Fall zu Fall von der Festplatte zusammensuchen müssen, wären aus Stunden Jahre an Rechenzeit geworden. Aber einen dafür ausreichend großen Arbeitsspeicher haben selbst die modernsten Computer nicht.

Die Atlas-Mathematiker griffen daher zu einem merkwürdigen Trick: Sie rechneten zunächst modulo 256. Das heißt, sie nahmen von allen Ergebnissen nur den Rest, der bei der Division durch 256 bleibt. Der liegt zwischen 0 und 255 und passt in ein einziges Byte, sodass die Anforderungen an den Arbeitsspeicher drastisch absanken. Das Ergebnis dieser verstümmelten Rechnung ist korrekt bis auf Vielfache von 256. Wenn es also ohnehin zwischen 0 und 255 liegt – und man sich dessen irgendwie vergewissern kann –, ist man fertig.

Wenn nicht, rechnet man das Ganze noch einmal, diesmal zum Beispiel modulo 255. Nimmt man beide Teilergebnisse zusammen, so ist das Ergebnis korrekt bis auf Vielfache des kleinsten gemeinsamen Vielfachen von 256 und 255, und das ist schon deutlich mehr. Am Ende kamen die Rechner mit den vier Moduli 251, 253, 255 und 256 zum Ziel.

Ein mathematisches Humangenomprojekt? Nicht ganz …

Der Mathematiker, der den größten Teil der Software für das Projekt Atlas schrieb, hat den triumphalen Erfolg seines Werks um wenige Monate verpasst: Fokko du Cloux von der Universität Lyon starb am 10. November letzten Jahres an amyotropher Lateralsklerose.

Wahrlich ein Monumentalwerk, gemessen an der schieren Menge der verarbeiteten Daten. Aber damit die Fachkollegen die »Atlas«-Gruppe ob des großen Presserummels nicht der maßlosen Prahlerei bezichtigen, beeilt sich Gruppensprecher Jeffrey Adams von der Universität von Maryland in College Park zu versichern, dass es sich hier nur um einen kleinen Schritt in Richtung auf ein großes Ziel handelt und dass die theoretischen Vorarbeiten, welche die gewaltige Rechnerei erst möglich machten, wesentlich bedeutender sind. Selbstverständlich maße man sich auch nicht an, sich mit dem Humangenomprojekt auf eine Stufe zu stellen.

In der Tat haben die beiden Projekte kaum etwas miteinander gemein – bis auf eins: Sie haben beide eine ungeheure Menge Daten in ungeheuer komprimierter Form erbracht, aber die Interpretation nicht mitgeliefert. Zweifellos ist aus den 100 Milliarden Polynomen noch viel nützliche Information zu ziehen, es ist nur noch nicht klar, wie. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872690.

AUTOR

Der Strichpunkt-Krieg

Jeder Programmierer weiß, dass es nur eine einzig wahre Computersprache gibt. Jede Woche eine neue.

Von Brian Hayes

Wer in aller Welt zu Gast bei Freunden sein will, hat einiges zu lernen – zum Beispiel 6912 Versionen der Frage: »Wo ist die Toilette, bitte?« Das ist die Zahl der bekannten auf der Erde gesprochenen Sprachen (siehe www.ethnologue.com).

Wer sich allen Computern der Welt verständlich machen will, steht vor einer nur geringfügig kleineren Aufgabe. Wie sagt man

```
printf("hello, world\n");
```

(hier in der Sprache C) in allen anderen Programmiersprachen? Nach einer Aufstellung von Bill Kinnersley von der Universität von Kansas gibt es deren rund 2500 Stück. In einer anderen Sammlung kommt Diarmuid Piggott von der Murdoch University in Perth (Australien) sogar auf mehr als 8500. Das ist erstaunlich, denn die menschlichen Sprachen haben sich im Lauf von Jahrtausenden entwickelt und diversifiziert, während es Computersprachen erst seit 50 Jahren gibt. Selbst nach den eher konservativen Annahmen der Kinnersley-Zählung bedeutet dies, dass seit Fortran jede Woche eine neue Computersprache erfunden wurde.

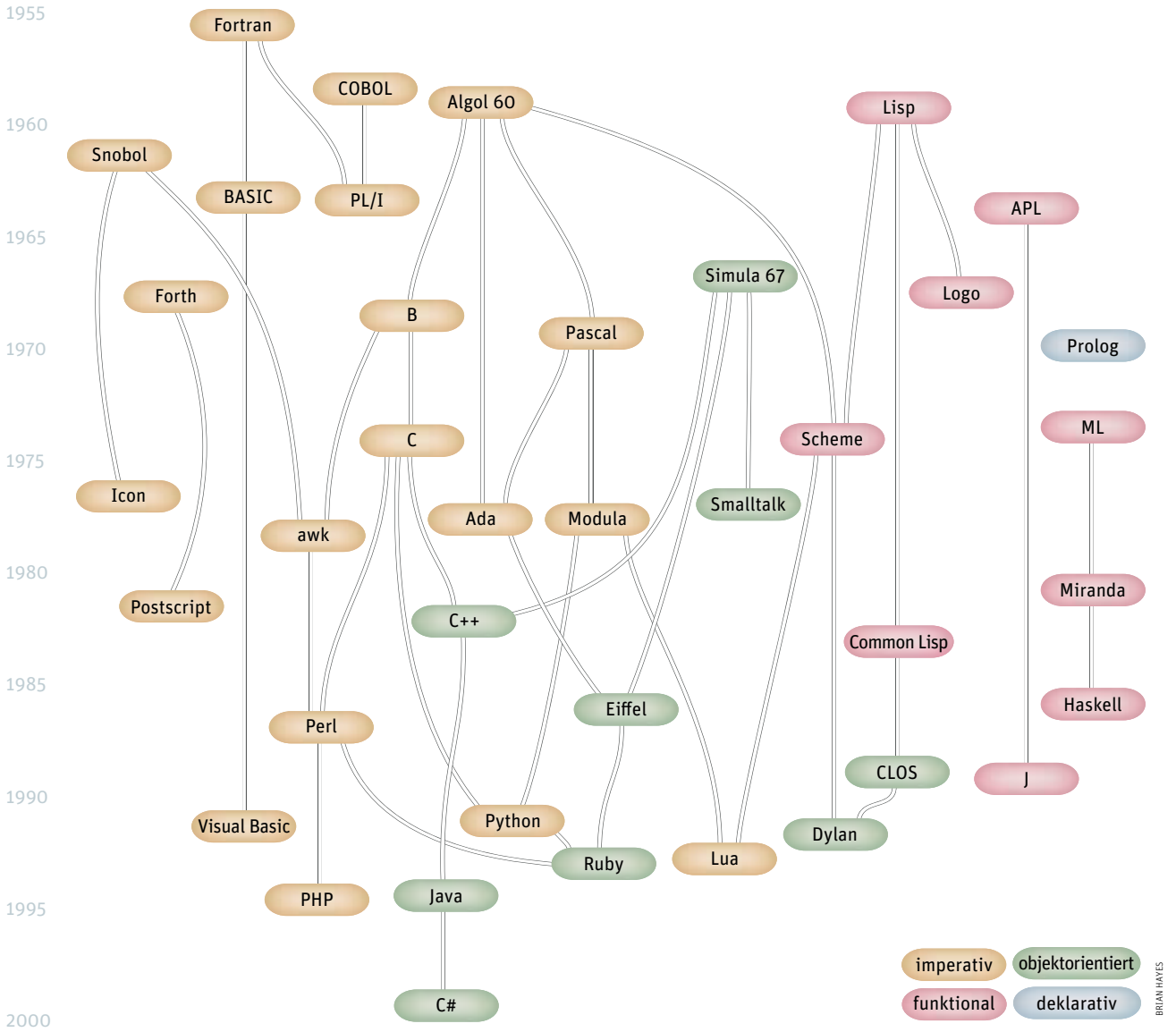
Für Völkerkundler ist die Sprachenvielfalt ein kultureller Schatz, der gepflegt und erhalten werden will, ähnlich der biologischen Artenvielfalt. Alle menschlichen Sprachen sind wertvoll; je mehr es gibt, desto besser. Diese Attitüde ehrfürchtigen Respekts vor der Kulturgeschichte ist in unserem Fall nur mühsam aufrechtzuerhalten. Eine neue Programmiersprache entsteht nicht durch eine unerforschliche Vielzahl winziger evolutionärer Schritte über einen langen Zeitraum, sondern durch einen bewussten Akt mit der Absicht, etwas Vorhandenes zu verbessern. Die Tatsache, dass noch immer neue Sprachen aus dem Boden schießen, beweist: Wir sind mit dem Verbessern noch lange nicht fertig. Wir kennen offenbar noch nicht die beste Schreibweise – oder auch nur eine hinreichend gute –, um einen Algorithmus auszudrücken oder eine Datenstruktur zu definieren.

Etliche Programmierer aus meinem Bekanntenkreis würden an dieser Stelle mit Nachdruck widersprechen. Die richtige Programmiersprache sei längst gefunden, und nur ein böswilliger Ignorant könne das Gegenteil behaupten. Nicht dass sie in allen Einzelheiten perfekt wäre; aber ihre Grundstruktur ist solide, sie löst das Hauptproblem, und nun sollten wir alle uns zusammentun, um sie zu verfeinern und zu verbessern. Leider meint jeder meiner Freunde eine andere Sprache. Es ist Lisp, sagt der eine. Nein, Python. Ruby. Java, C#, Lua, Haskell, Prolog, Curl.

Sprachenvielfalt hat auch eine Schattenseite. Völker unterschiedlicher Sprachen gehen nicht immer friedfertig miteinander um. Unweigerlich kommt einem das Wort »Balkanisierung« in den Sinn. Und ebenso wie die Länder Südosteuropas hatte die Computerbranche unter Abspaltungen und bitteren Konflikten zu leiden. Meines Wissens sind in diesem Streit noch keine Todesfälle zu beklagen, aber der rüden Worte wurden mehr als genug gewechselt – in vielen Sprachen.

Klein-Ender gegen Groß-Ender

Als Gulliver, der Held von Jonathan Swifts 1726 erschienenem fantastischen Roman, schiffbrüchig an die Küste von Liliput angespült wird, erfährt er, dass die Liliputaner mit den Bewohnern der Nachbarinsel Blefuscu einen überaus grausamen Krieg um die Frage führen, ob man ein gekochtes Ei am stumpfen oder am spitzen Ende aufschlagen soll. Der sprichwörtlich gewordene Sturm im Eierbecher fand 250 Jahre später eine Wiederaufführung in der echten (Computer-)Welt. Eine Binärzahl kann entweder »von rechts nach links«, das heißt mit der Einerziffer zuerst, oder »von links nach rechts«, das heißt mit



Diese Chronologie ausgewählter Programmiersprachen ist kein echter Stammbaum; die Linien zeigen nur an, welche Sprachen einander erheblich beeinflusst haben. Auch die Klassifikation der Sprachen (Farbcode rechts unten) ist als Näherung zu verstehen; nur einige »reine« Sprachen gehören ausschließlich in eine dieser Kategorien. Das Material dieser Grafik stammt zum Teil von Éric Lévénez und Pascal Rigaux sowie aus Konferenzen zur Geschichte der Programmiersprachen, welche die Association for Computing Machinery veranstaltete.

der Ziffer mit dem höchsten Stellenwert zuerst, übertragen werden. Da alles, womit ein Computer umgeht, letzten Endes Binärzahlen sind, betrifft die Frage, ob das dicke oder das dünne Ende zuerst kommt, alle Daten überhaupt. Was ist besser? Es macht praktisch keinen Unterschied, aber das Leben wäre um einiges einfacher, wenn alle dieselbe Wahl träfen. Dies ist nicht der Fall, und deshalb müssen beim Übergang zwischen verschiedenen Systemen unter großem Aufwand an Hard- und Software unzählige kleine Binär-Eier umgedreht werden.

Danny Cohen von der Universität von Süd-Kalifornien war der Erste, der den modernen Krieg der Klein-Ender gegen die Groß-Ender mit Swifts Geschichte in Beziehung setzte. Sein glänzend geschriebener Artikel »On holy wars and a plea for peace« (»Über heilige Kriege und ein Friedensgesuch«), der 1980 in der Zeitschrift »Computer« erschien, wurde von vielen gelesen und geschätzt; das Friedensgesuch indes blieb unerhört.

Ein anderer – eingeschlafener, aber nie offiziell beigelegter – Konflikt tobte um das Semikolon. In Algol und Pascal müssen Programmbefehle durch Strichpunkte getrennt werden. In einem Programmstück wie

```
x:=0; y:=x+1; z:=2
```

zeigen sie dem Compiler (dem Programm, welches das Programm des Benutzers verarbeitet), wo ein Befehl endet und der nächste anfängt. Auch C-Programme sind voller Strichpunkte; dort aber zeigen diese nicht die Grenze zwischen zwei Befehlen an, sondern das Ende eines Befehls. Worin besteht der Unterschied? In C muss nach dem letzten Befehl ein Semikolon stehen, in Pascal nicht. Das war eine der Diskrepanzen, über die Brian W. Kernighan von den AT&T Bell-Laboratorien 1981 in dem berühmt gewordenen Pamphlet »Why Pascal is not my favorite programming language« (»Warum Pascal nicht meine Lieblingssprache ist«) herzog. Die ▷

▷ Streitschrift wurde nie veröffentlicht, fand jedoch unter der Hand weite Verbreitung (immerhin ist Kernighan einer der Schöpfer des Betriebssystems Unix und zahlreicher Programmiersprachen) und läutete – wie man im Rückblick erkennen kann – das Ende von Pascal als einer ernst zu nehmenden Programmiersprache ein.

Einen weiteren Grund für fortdauernde Streitigkeiten liefert die Zählweise. Soll man die Elemente einer Liste mit 0, 1, 2 oder mit 1, 2, 3 nummerieren? Jeder im Reich der Computer weiß die richtige Antwort und vertritt sie mit tiefster Überzeugung. Aber welche ist die richtige? Nehmen wir den Java-Ausdruck `Date(2006, 1, 1)`. Für welches Kalenderdatum steht er Ihrer Meinung nach? Die Antwort lautet: für den 1. Februar 3906. In Java werden die Monate von 0 an gezählt, Tage ab 1 und Jahre ab 1900.

Programmierstile

Ein und dasselbe Problem kann sowohl im imperativen als auch im funktionalen Stil gelöst werden. Die hier gezeigten Programme berechnen beide die Fakultät der Zahl *n*: das Produkt aller natürlichen Zahlen zwischen 1 und *n*.

Die imperative Prozedur (oberes Schema) arbeitet mit einer Iterationsschleife (»`for i = 1,n do`«): Dem Computer wird befohlen, immer wieder den Wert einer Variablen namens `accumulator` zu überschreiben.

Das funktionale Programm (unten) dagegen sagt dem Computer nicht direkt, was er der Reihe nach zu tun hat. Vielmehr führt es die Lösung des Problems »Berechne die Fakultät von *n*« auf die des einfacheren Problems »Berechne die Fakultät von *n*–1« zurück. Zusammen mit der Startbedingung »Die Fakultät von 1 ist 1« ist auch dies eine vollständige Anweisung. Der Computer führt dieses Programm aus, indem das Funktionsunterprogramm `factR` sich immer wieder selbst aufruft, bis das innerste Unterprogramm den Wert 1 zurückgibt und daraufhin das Produkt von innen nach außen berechnet wird.

Diese »rekursive« Formulierung ist häufig die geschickteste Weise, die Lösung eines mathematischen Problems auszudrücken; mit dem funktionalen Stil wird das zugehörige Computerprogramm ebenso elegant wie die mathematische Lösung.

Es gibt Programmiersprachen, die ausschließlich imperativ oder ausschließlich funktional sind. Diese Beispiele sind jedoch beide in der Sprache Lua geschrieben, die in den 1990er Jahren an der Bischöflichen Katholischen Universität in Rio de Janeiro entwickelt wurde.

Imperatives Programm

```
function factI (n)
   local accumulator = 1
   for i = 1,n do
      accumulator = accumulator*i
   end
   return accumulator
end
```

Programmablauf

```
factI(4):
        accumulator = 1
i = 1   accumulator = 1 * 1
        accumulator = 1 * 2
        accumulator = 2 * 3
        accumulator = 6 * 4
return 24
```

Funktionales Programm

```
function factR (n)
   if n == 1 then
      return 1
   else
      return n*factR(n-1)
   end
end
```

Programmablauf

```
factR(4):
4 *  factR(3) =
     3 *  factR(2) =
          2 *  factR(1) =
                    1
               1
          2
     6
24
```

BRIAN HAYES

Selbst Programmteile, die eigentlich gar keine sind, sorgen für Zwietracht. »Kommentare« sind für menschliche Leser gedacht und müssen in irgendeiner Weise gekennzeichnet werden, damit der Compiler sie ignoriert. Das sollte doch nicht so schwer sein, ein einheitliches Zeichen zu wählen, das in allen Programmen diesem Zweck dient. Doch das von Pascal Rigaux zusammengestellte Kompendium der Programmiersprachen-Syntax – ein wunderbares Dokument, nebenbei gesagt –, zählt 39 inkompatible Kommentar-Kennzeichen auf: `#` in awk; `\` in Forth; `(* ... *)` in Pascal; `/* ... */` in C … . Außerdem tobt eine Diskussion darüber, ob Kommentare »schachtelbar« *(nestable)* sein sollten – ob es also erlaubt sein soll, Kommentare innerhalb von Kommentaren zu schreiben.

Und dann gibt es noch die Kontroverse über den *CamelCase*. Die meisten Programmiersprachen schreiben vor, dass die vom Programmierer zu vergebenden Namen für Variable, Prozeduren und so weiter aus einem einzigen Wort bestehen müssen, das keine Leerzeichen enthalten darf. Aber Allewörterzusammengeschrieben ist schlecht lesbar. So kam man darauf, die entsprechenden Wörter nicht in *upper case* (Großbuchstaben) oder *lower case* (Kleinbuchstaben), sondern in *CamelCase* zu schreiben – mit dem Höcker in der Mitte. Offen gestanden: Es gibt zurzeit keinen ernsthaften Streit darum, ebenso wie sich nur noch die ärgsten WahrerInnen der deutschen Rechtschreibung über das Binnen-I in Wörtern wie »StudentInnen« oder »ErstsemesterInnen« aufregen. Aber der Name allein gab Anlass für gelehrte und spaßige Diskussionen, in denen auch traditionelle Artnamen wie *Camelus dromedarius* und *C. bactrianus* aufgegriffen wurden. Außerdem öffneten sie den Blick für Verfeinerungen wie den *sulking-CamelCase* (»Kamel mit hängendem Kopf«).

Wenn ich mich hier – zu Recht, glaube ich – über einige Mätzchen lustig mache, möchte ich keineswegs den Eindruck erwecken, es gehe nur um kosmetische Belange oder alle Programmiersprachen seien im Grunde dasselbe. Im Gegenteil: Das Faszinierende an Programmiersprachen ist, wie extrem sie sich unterscheiden. Ich halte dafür, dass beispielsweise C und Lisp weiter voneinander entfernt sind als zwei beliebige menschliche Sprachen.

Noam Chomsky behauptet, alle menschlichen Sprachen hätten dieselbe »Tiefenstruktur«, die vielleicht sogar im Gehirn »fest verdrahtet« sei. Auch bei den Computersprachen scheint es universelle Eigenschaften zu geben. Fast allen liegt eine einheitliche Struktur zu Grunde, die so genannte kontextfreie Grammatik. Auch auf der semantischen Ebene sind sie fast alle gleich mächtig: Was man in der einen Sprache programmieren kann, gelingt auch in jeder anderen – mit entsprechendem Aufwand. Doch diese formale Äquivalenz ist irreführend. Den Anwendern geht es nicht um die Grenzen der Ausdrucksmöglichkeiten, sondern darum, wie schnell und elegant man dem Computer sagen kann, was er tun soll.

In den 1930er Jahren behaupteten die Linguisten Edward Sapir und Benjamin Lee Whorf, dass das, was man denken kann, von der Sprache abhängt, in der man denkt. In Bezug auf die natürlichen Sprachen ist die Sapir-Whorf-Hypothese vielfach angefochten worden; bei Computersprachen indes hat sie einiges für sich. Die Konstrukte, die eine Sprache bereitstellt, beeinflussen in hohem Maße die Denkansätze und Problemlösungsstrategien des Programmierers.

Es gibt 39 verschiedene Vorschriften, wie man den Computer anzuweisen hat, gewisse Teile des Programms nicht zur Kenntnis zu nehmen

Kleine Computersprachkunde

Programmiersprachen werden üblicherweise in vier Gruppen unterteilt. Imperative Sprachen basieren auf Befehlen: Mach dies, mach das, mach das nächste (Kasten links). Die Ausführung eines Befehls verwendet abgespeicherte Daten und wirkt auf sie zurück, wobei im Prinzip der Zustand des Systems an jeder Stelle verändert werden kann. Alle frühen Sprachen wie Fortran, Cobol und Algol sind in erster Linie imperativ.

Hinter den funktionalen Programmiersprachen steckt die Idee der mathematischen Funktion, zum Beispiel $f(x) = x^2$. Eine Funktion ist ein Unterprogramm, eine *black box*, die als Input ein Argument (das x) entgegennimmt und als Output den Funktionswert (das $f(x)$) liefert. Wesentlich ist, dass die Berechnung nur von den Argumenten abhängt und nur den Ausgabewert beeinflusst; es gibt keine Nebenwirkungen. Diese Eigenschaft macht das Verhalten funktionaler Programme durchschaubar: Um zu verstehen, was geschieht, wenn das Programm eine Funktion ausführt, kann man den gesamten Rest des Computers getrost außer Acht lassen. Funktionales Programmieren begann mit Lisp (Spektrum der Wissenschaft 4/1983, S. 14, 5/1983, S. 13, 6/1983, S. 10 und 7/1983, S. 6); allerdings erlaubt diese Sprache auch andere Programmierstile. John Backus, der führende Entwickler von Fortran, der auch Beiträge zu Algol leistete, wurde später zum Verfechter der funktionalen Sprachen. Seitdem sind einige »reine« funktionale Sprachen entwickelt worden, darunter Miranda und Haskell, sowie einige nicht ganz so reine wie ML.

Beim objektorientierten Programmieren werden Befehle und die zugehörigen Daten zu einer geschlossenen Struktur verbunden. Man ▷

»Fortran ist eine frühkindliche Entwicklungsstörung, PL/I eine tödliche Krankheit, und das Lehren von Cobol sollte als Misshandlung des Gehirns unter Strafe gestellt werden«

▷ schreibt also nicht mehr eine Prozedur, die gewisse Dinge mit einer Datenstruktur tun soll, sondern definiert eine Datenstruktur (eine »Klasse«, deren Elemente einzelne »Objekte« sind); in der Definition enthalten sind die Prozeduren, die auf diese Datenstruktur wirken können. Bei den meisten objektorientierten Sprachen gibt es auch den Begriff der »Vererbung«: Elemente einer untergeordneten Klasse »erben« alle Eigenschaften, die den Objekten der übergeordneten Klasse zukommen, sodass der Programmierer nur noch das definieren muss, was die Elemente der speziellen Klasse von denen der allgemeinen unterscheidet. Die objektorientierten Sprachen gehen auf SIMULA 67 zurück, erregten jedoch erst mit Smalltalk in den 1980er Jahren Aufmerksamkeit. Kurioserweise wurde das Prinzip der Objektorientierung sehr populär, nicht jedoch die Sprache Smalltalk; stattdessen wurden objektorientierte Merkmale an bestehende Sprachen angeschraubt. C beispielsweise entwickelte sich über C++ und Objective-C bis zu C#; Java zählt ebenfalls zu dieser Familie. Inzwischen hat objektorientiertes Gedankengut fast alle neuen Sprachen infiltriert.

Die vierte Gruppe von Programmiersprachen wird als logische, relationale oder deklarative Sprachen bezeichnet. Sie haben gemeinsam, dass der Programmierer dem Computer nicht Schritt für Schritt vorschreibt, was er tun soll, sondern Fakten (»Waldi ist ein Dackel«) und Relationen (»Alle Dackel sind Hunde«) notiert. Dem Computer bleibt es dann überlassen, wie er die Fragen des Benutzers beantwortet, indem er aus Fakten und Relationen Schlüsse zieht. Die bekannteste dieser Sprachen ist Prolog. Verwandte Konzepte gibt es auch in Sprachen für alltäglichere Anwendungen wie Datenbankabfragen und Tabellenkalkulation.

Diese vier Kategorien bezeichnen nur die Unterschiede im Grundprinzip. Programmiersprachen unterscheiden sich in vielen weiteren Merkmalen, zum Beispiel in der äußeren Erscheinung. C ist sehr wortkarg, Cobol sehr weitschweifig. Lisp ist voller Klammern. Perl, sagte ein Witzbold, sieht aus wie Snoopy beim Fluchen: »@&$^^#@!«

Sprachen werden auch in »niedere« *(low-level)* und »höhere« *(high-level)* eingeteilt. Niedere Sprachen erlauben direkteren Zugriff auf die Hardware der Computer wie Adressen im Arbeitsspeicher oder Ein- und Ausgabegeräte. Bei höheren Sprachen liegt eine schützende »Abstraktionsschicht« dazwischen.

In den 1970er Jahren war »strukturelles Programmieren« sehr in Mode. Man wurde gezwungen, strenge Regeln über Datentypen einzuhalten: Für jeden zu verwendenden Speicherplatz musste man vorab festlegen, welche Sorte Daten dort stehen sollte, und war strikt an diese Festlegung gebunden. Außerdem war der Befehl »go to« praktisch verboten: Man durfte das Programm nicht einfach irgendwie von der niedergeschriebenen Folge der Befehle abweichen lassen, sondern musste dafür spezielle grammatische Konstruktionen verwenden. Der klassische Vertreter dieser Sprachengruppe ist Pascal. Bald wurden die strengen Regeln als »bondage and discipline« verspottet; so nennen die Sadomasochisten ihre Fesselungs- und Züchtigungsspiele. Die meisten Programmierer konnten aus dieser Einschränkung ihrer Bewegungsmöglichkeiten nicht den rechten Lustgewinn ziehen; als Gegenreaktion erblickten zügellosere Sprachen wie C das Licht der Welt.

Programmiersprachen unterscheiden sich auch in Zielgruppe und Anwendungsgebiet. Fortran (FORmula TRANslator) begann als Sprache für wissenschaftliche Berechnungen, Cobol (COmmon Business Oriented Language) diente geschäftlichen Anwendungen. Etliche interessante Sprachen waren ursprünglich für Lehrzwecke oder für Kinder gedacht. Basic, Pascal und Smalltalk gehören dazu, ebenso Logo. Alle diese Sprachen mussten zunächst darum kämpfen, von den Erwachsenen ernst genommen zu werden.

Bekehrung aus edelsten Motiven

Nachdem es so viele so verschiedene Programmiersprachen gibt, »lasst tausend Blumen blühen«, freut euch der Vielfalt und lasst jedem seinen Spaß – könnte man sagen. Stattdessen führen wir Kreuzzüge, um die Verblendeten zu konvertieren oder notfalls auszurotten.

Edsger W. Dijkstra, einer der bedeutenden Köpfe aus dem Lager der strukturierten Programmierung, schrieb 1975 ein Thesenpapier mit dem Titel »How do we tell truths that might hurt?« (»Wie sprechen wir schmerzhafte Wahrheiten aus?«). Und bei der Verbreitung seiner »Wahrheiten« nahm er kein Blatt vor den Mund. Fortran sei »eine frühkindliche Entwicklungsstörung«, PL/I »eine tödliche Krankheit«, APL »ein Fehler, der bis zur Perfektion getrieben wurde«. Schüler, die dem Einfluss von Basic ausgesetzt seien, würden »geistig verstümmelt ohne Hoffnung auf Besserung«, und das Lehren von Cobol sollte »als Misshandlung des Gehirns unter Strafe gestellt werden«. Als das Papier einige Jahre später veröffentlicht wurde, zahlten die Verteidiger von Cobol und Basic die Kritik mit gleicher Münze heim, kamen allerdings in der Diktion an Dijkstras ätzenden Sarkasmus nicht heran.

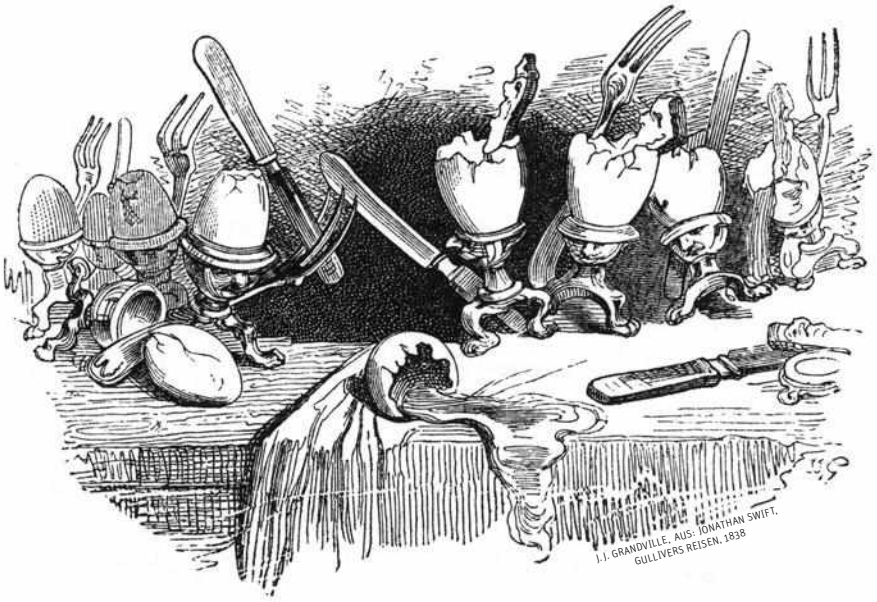
Die meisten Dispute über Programmiersprachen sind nicht so bösartig und humorlos

wie Dijkstras »Wahrheiten«-Pamphlet. Heutige Missionare geben sich lockerer; sie wenden mehr Zeit damit auf, ihre eigene Religion zu preisen, als die der anderen schlecht zu machen. Ihre Predigten lauten nicht mehr: »Du wirst in der Hölle schmoren, wenn du in C programmierst«, sondern: »Schau, welch ein Paradies Python dir bietet«. (Irgendwie gefielen mir die alten Sprüche besser.)

Hinter den meisten Bekehrungsversuchen dieser Art stecken die edelsten Motive. Wer ein intelligentes und elegantes Programmiermittel gefunden zu haben glaubt, will die ganze Welt mit seiner guten Tat beglücken. Allerdings ist auch Eigeninteresse mit im Spiel. Damit die Sprache *P* gedeiht, muss sie eine Anwendergemeinde haben: Leute, die Programme in *P* schreiben, Bücher über *P* kaufen, ihre Studenten in *P* unterrichten, *P*-Programmierer einstellen und darauf bestehen, dass *P* auch auf dem neu anzuschaffenden System läuft. Jeder, der zu *P* bekehrt wird, erhöht die Überlebenschancen von *P*. Wenn er von der konkurrierenden Sprache *Q* kommt, umso besser.

Streitereien über die Schreibweise sind nicht auf die Welt der Computer beschränkt. In der Folge des Prioritätsstreits zwischen Gottfried Wilhelm Leibniz und Isaac Newton zankten sich die Mathematiker jahrzehntelang, ob man eine Ableitung als dx/dt (Leibniz) oder als $\dot{x}$ (Newton) schreiben sollte. Chemiker gerieten sich über die Benennung von Molekülen in die Haare. Selbst Schachspieler stritten über die Notation der Züge. Doch in der Computerwissenschaft ist das Problem eine Nummer größer. In der Differenzialrechnung gab es niemals 2500 unterschiedliche Schreibweisen für eine Ableitung.

In all den Jahren wurde das Gezeter um Programmiersprachen wiederholt als Bedrohung für den weiteren Fortschritt der Computerwissenschaft betrachtet. Die übliche Reaktion bestand darin – dreimal dürfen Sie raten –, eine weitere Computersprache zu entwickeln. »Wenn wir nur alle uns zusammentun und uns auf eine einzige, letzte, große Computersprache einigen würden …« Das war in den 1960er Jahren das Motiv für die Entwicklung von PL/I, jener Sprache, die Dijkstra als »tödliche Krankheit« schmähte. Später sollte – auf Betreiben des US-Verteidigungsministeriums – Ada die universelle Programmiersprache werden. Vor zehn Jahren schließlich lag alle Hoffnung auf Java (Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 17), die vor allem zur Verbreitung übers Internet konzipiert war. »Write once, run anywhere« (»einmal schreiben, überall betreiben«) war der Slogan, der nur beschränkt in Erfüllung gegangen ist.



In diesem Gemetzel am Frühstückstisch endet der Krieg zwischen den »Klein-Endern« und den »Groß-Endern«. Der Stich aus der 1838 erschienenen Ausgabe von »Gullivers Reisen« stammt von J. J. Grandville.

Einige Computersprachen, vor allem Fortran und Lisp, scheinen nahezu unsterblich zu sein. Die anderen sind wie Wellen, die an den Strand branden und dann im Sand versickern. Auf dem Kamm der jüngsten Welle reiten die so genannten Script-Sprachen wie Python und Ruby. Sie sind von bescheidener Herkunft. Eigentlich ist ein Script eine Folge von Befehlen an ein Betriebssystem wie Unix, mit der man mehrere Programme in Folge ablaufen lassen und die Datenübergabe zwischen ihnen regeln kann. Außerdem gibt es *extension languages*, Erweiterungssprachen, mit denen man ein vorhandenes Programm um gewisse Dinge bereichern kann, ohne in den Programmtext selbst einzugreifen. Doch inzwischen haben sich die Script-Sprachen zu Allzweck-Programmiersprachen gemausert. Heute werden damit oft Internetanwendungen geschrieben. Python wird auch in der Wissenschaft verwandt.

Das Internet brachte der Artenvielfalt einen neuen Aufschwung. Wer heute eine Website verwalten will, muss sich in einem halben Dutzend Programmier- und Datenformatierungs-Sprachen auskennen. Da gibt es HTML *(HyperText Markup Language)* für die Grundstruktur der Webseiten und CSS *(Cascading Style Sheets)* für die Details der Präsentation, dazu Javascript für Dinge wie Pop-up-Fenster, mit denen man den Benutzer nerven kann. Auf dem Serve werden die Inhalte meist in einer Variante von XML *(Extensible Markup Language)* abgelegt und mit einer Datenbankabfragesprache wie SQL abgerufen. All diese Einzelteile werden mit einer Script-Sprache zusammengehalten, etwa PHP, Perl, Python oder Ruby.

Natürlich schreit die Situation geradezu nach einer weiteren Sprache, die alle anderen ersetzt. Zwei Kandidaten stehen schon bereit: Curl und Links. ▷

▷ Mein Friedensgesuch wäre glaubwürdiger, wenn ich mich als unparteiischer Schiedsrichter präsentieren könnte, der kein Interesse am Ausgang des Sprachenstreits hat. Doch es ist Zeit, ein Bekenntnis abzulegen: Auch ich habe eine bevorzugte Programmiersprache, an der ich hänge wie ein Kind an einem abgewetzten Teddybär. Nehmt mir bitte, bitte mein Lisp nicht weg!

Es ist schwer, meine Vorliebe für Lisp zu begründen, ohne selbst in missionarischen Glaubenseifer zu verfallen. Sagen wir's so: Es ist eine sehr einfache Sprache mit einem einzigen Trick; und den beherrscht sie sehr gut. Jeder Lisp-Ausdruck ist eine Liste. Wenn der Computer eine solche Liste bekommt, nimmt er deren erstes Element als den Namen einer Funktion und alle weiteren Elemente als die Argumente dieser Funktion. Ein Beispiel: `(/ (+3 5) 2)` ist ein Programm, das `(+3 5)` durch 2 teilt; dabei ist das erste Argument der Funktion / wieder eine Liste, nämlich das Unterprogramm `(+3 5)`, das 3 und 5 addiert. Der Wert dieses ganzen Ausdrucks ist 4. Die Syntax ist extrem einfach, fast schon primitiv, aber darin liegt ihre Stärke. Die Verfechter von Lisp betonen immer, dass Daten und Programme auf dieselbe Weise dargestellt werden. Dies macht es einfach, Programme zu schreiben, die andere Programme beeinflussen.

Das ist wahr, aber was speziell mich begeistert, ist die Einheitlichkeit der Notation. Alles wird auf dieselbe Weise erledigt, man muss sich also nicht viel merken. (Was ich lieber verschweige, ist die Überfülle an Klammern in Lisp (die einige Leute ärgert). (Was die Welt braucht (meiner Meinung nach) ist nicht (eine Lisp-Variante (mit weniger Klammern)), sondern (eine gewöhnliche Schriftsprache (mit mehr)).))

Lisp wurde vor mehr als fünfzig Jahren von John McCarthy entwickelt, der jetzt an der Universität Stanford lehrt. Ich selbst kenne es seit 25 Jahren. Da mag meine persönliche Vorliebe schon etwas antiquiert, stur und hinterwäldlerisch anmuten, so als würde ich darauf bestehen, mich auf Lateinisch auszudrücken. Hat denn die Entwicklung der letzten fünfzig Jahre mit ihren 2500 Sprachen wirklich nichts hervorgebracht, das besser wäre als Lisp?

Nein, das würde ich nicht behaupten. Und natürlich ist das Lisp, das ich heute »spreche«, nicht die gleiche Sprache, die McCarthy vor 50 Jahren einführte. Lisp wurde erweitert, überholt, aktualisiert und aus den zahlreichen Dialekten, in die es zwischendurch zerfallen war, zu einem neuen Standard namens Common Lisp wiedervereinigt. Aber die Teile der Sprache, die mir am besten gefallen, sind diejenigen, die es von Anfang an gab und die am wenigsten verändert wurden.

Vor zwei Jahren fand in Stanford eine internationale Lisp-Konferenz statt. Die Gläubigen waren unter sich, und natürlich sprachen sie auch darüber, wie man das Lisp-Evangelium dem Rest der Welt vermittelt. Zugleich zeigte sich, dass selbst Vertreter derselben Sprache sich bis tief in die Nacht in die Haare geraten können.

Nehmt mir meinen Teddybär nicht weg!

Am Ende der letzten Sitzung ergriff John McCarthy das Wort. Er ließ seinen Blick über die Zuhörer schweifen und sagte: »Wenn jemand in diesem Raum eine Bombe zündete, würde die Hälfte der weltweiten Lisp-Gemeinde ausgelöscht. Für die Sprache Lisp wäre das nicht schlecht, weil man sie dann neu erfinden müsste.« Damit wollte er nicht nur zum Ausdruck bringen, dass der Common-Lisp-Standard weiteren Innovationen im Wege steht – das Gute, einmal fest etabliert, ist immer der Feind des Besseren –, sondern dass er selbst, wenn er noch einmal von vorne anfangen könnte, einiges anders machen würde. Selbst der Schöpfer einer Sprache sieht sie also als weiter verbesserungsfähig an. Ich fand McCarthys Offenheit erfrischend, aber zugleich kroch der Gedanke in mir hoch: Nein, nein, bastel bitte nicht daran herum. Ich mag Lisp genau so, wie es ist.

Ja, ich bin überzeugt, dass Lisp zu den besseren Programmiersprachen zu zählen ist. Aber das ist nicht der eigentliche Grund meiner Liebe. Ich programmiere in Lisp aus demselben Grund, wie ich Prosa auf Englisch schreibe: nicht weil es die beste Sprache wäre, sondern weil es diejenige ist, die ich am besten beherrsche. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Brian Hayes ist Mathematiker und Redakteur von American Scientist.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Selected papers on computer languages. Von Donald E. Knuth. CSLI Publications, Stanford (Kalifornien) 2003

History of programming languages II. Von Thomas J. Bergin und Richard G. Gibson jr. (Hg.). ACM Press, New York 1996

History of programming languages. Von Richard L. Wexelblat (Hg.). Academic Press, New York 1978

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/872689.

Methan auf Mars und Titan

Produkt außerirdischen Lebens oder geologischer Prozesse? Planetologen rätseln über die Herkunft des Treibhausgases auf dem Roten Planeten und dem Saturnmond

RON MILLER

WEITERE THEMEN IM JULI

Dolce Vita in Baiae

Mildes Klima, heiße Quellen – im Nobelkurort Baiae ließen es sich reiche Römer gut gehen. Mancher Zeitgenosse warnte gar vor Lasterhaftigkeit und unrömischem Wohlleben

JEN CHRISTIANSEN

Rabenintelligenz

Kolkraben können logisch denken, antizipieren, was Artgenossen vorhaben, und durchkreuzen schon mal deren Pläne

MATT COLLINS

Quantenradierer selbst gemacht

Eine bescheidene Ausrüstung reicht aus, um zu Hause eines der seltsamsten Phänomene der Mikrophysik zu demonstrieren. Wir zeigen, wie das geht

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter

Ganz oder gar nicht

Die Gestaltpsychologie gilt als das Werk eines Forschertrios, das ab 1910 in Frankfurt und später in Berlin zusammenarbeitete: Max Wertheimer, Kurt Koffka und Wolfgang Köhler. Doch waren sie beileibe nicht die Einzigen, die Wahrnehmung und Denken als ganzheitliche Prozesse verstanden.

VON HELMUT E. LÜCK

Eine Rose ist eine Rose ist eine Rose. Die amerikanische Dichterin Gertrude Stein, die diesen Ausspruch prägte, hatte mit Gestalttheorie wenig zu tun. Dennoch brachte sie in ihrem berühmtesten Vers (aus dem Gedicht »Sacred Emily« von 1913) ein Erstaunen zum Ausdruck, das auch manche Psychologen jener Zeit überkam. Denn die vier Buchstaben R, o, s, e ergeben in unserem Kopf nicht einfach ein Wort; sie evozieren das Bild der Blüte, ihren Duft, ihre Symbolkraft – alles Eigenschaften, die mit den Lettern selbst gar nichts zu tun haben. Kurz: Sie erschaffen eine Gestalt.

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile – so lautet der Leitsatz der Gestaltpsychologie. Genauer gesagt: Das Ganze ist etwas anderes als die Summe seiner Teile. Dieses Prinzip bezeichnen Psychologen als Übersummenhaftigkeit oder Übersummativität. Ein zweites wichtiges Merkmal der Gestalt ist ihre Transponierbarkeit: Unabhängig von den einzelnen »Bauelementen« erkennen wir eine Gestalt stets als solche wieder. Einen Stuhl etwa nehmen wir immer als Stuhl wahr, auch wenn der eine aus Holz ist und der andere aus Metall.

Diese beiden Kriterien hat der österreichische Psychologe Christian von Ehrenfels (1859–1932) in seinem Aufsatz »Über Gestaltqualitäten« (1890) erstmals herausgearbeitet. Er verdeutlicht sie am Beispiel der Melodie: Zerlegen wir diese in ihre einzelnen Töne, bricht der kohärente Höreindruck augenblicklich zusammen. Eine Melodie, die uns beschwingt oder traurig macht, zu Tränen rührt oder zum Tanzen animiert, entsteht erst in der zeitlichen Abfolge mit bestimmter Intonation und Lautstärke. Ihre grundlegend neue Qualität geht den einzelnen Bestandteilen, aus denen sich die Melodie zusammensetzt, dabei völlig ab. Auch die Transponierbarkeit von Melodien ist offenkundig: Spielt man sie ein paar Töne höher oder tiefer, ändert sich nichts an ihrer Eigenschaft. Auf diese beiden Gestaltkriterien haben sich nachfolgende Psychologen immer wieder berufen.

Christian von Ehrenfels war Mitarbeiter von Alexius Meinong (1853–1920) an der Universität in Graz, wo erstmals eine wissenschaftlich begründete Gestalttheorie aufgestellt wurde. Meinong, der stark von den Arbeiten seines Schülers profitierte, unterschied den Inhalt einer Wahrnehmung oder eines Gedankens streng von deren einzelnen Elementen. Zusammenhängende Gesamtheiten – Meinong sprach von »Komplexionen« – könnten nicht aus ihren Teilen heraus erklärt wer-

STEPHEN COBURN / FOTOLIA.DE

SERIE GESCHICHTE DER PSYCHOLOGIE: Menschen, Methoden und Modelle
▶ Überblick (4/2007) ▶ Psychophysik (5/2007) ▶ Psychoanalyse (6/2007) ▶ Gestaltpsychologie (7-8/2007) ▶ Behaviorismus (9/2007) ▶ Kognitive Wende (10/2007) ▶ Neuropsychologie (11/2007)

RONALD C. JAMES; AUS: RONALD G. CARRAHER, JACQUELINE B. THURSTON, OPTICAL ILLUSIONS AND THE VISUAL ARTS, 1966

KLEINE FLECKENKUNDE

Haben Sie ihn sofort erkannt, den Dalmatiner in der Bildmitte? Selbst aus einem so rudimentären Flickenteppich gewinnt das Gehirn erkennbare Gestalten.

den. Sie seien vielmehr von unserer geistigen Eigenaktivität abhängig: Erst aus dieser »Produktion« gehe der ganzheitliche Eindruck hervor.

Dieser Idee verdankt die Grazer Schule der Gestaltpsychologie ihren Namen: Sie wird auch als Produktionstheorie bezeichnet. Schon bald jedoch wurde sie von einem neuen Ansatz abgelöst, den eine Gruppe von Forschern zunächst in Frankfurt und dann in Berlin verfolgte.

Eine Zugfahrt, die ist lehrreich

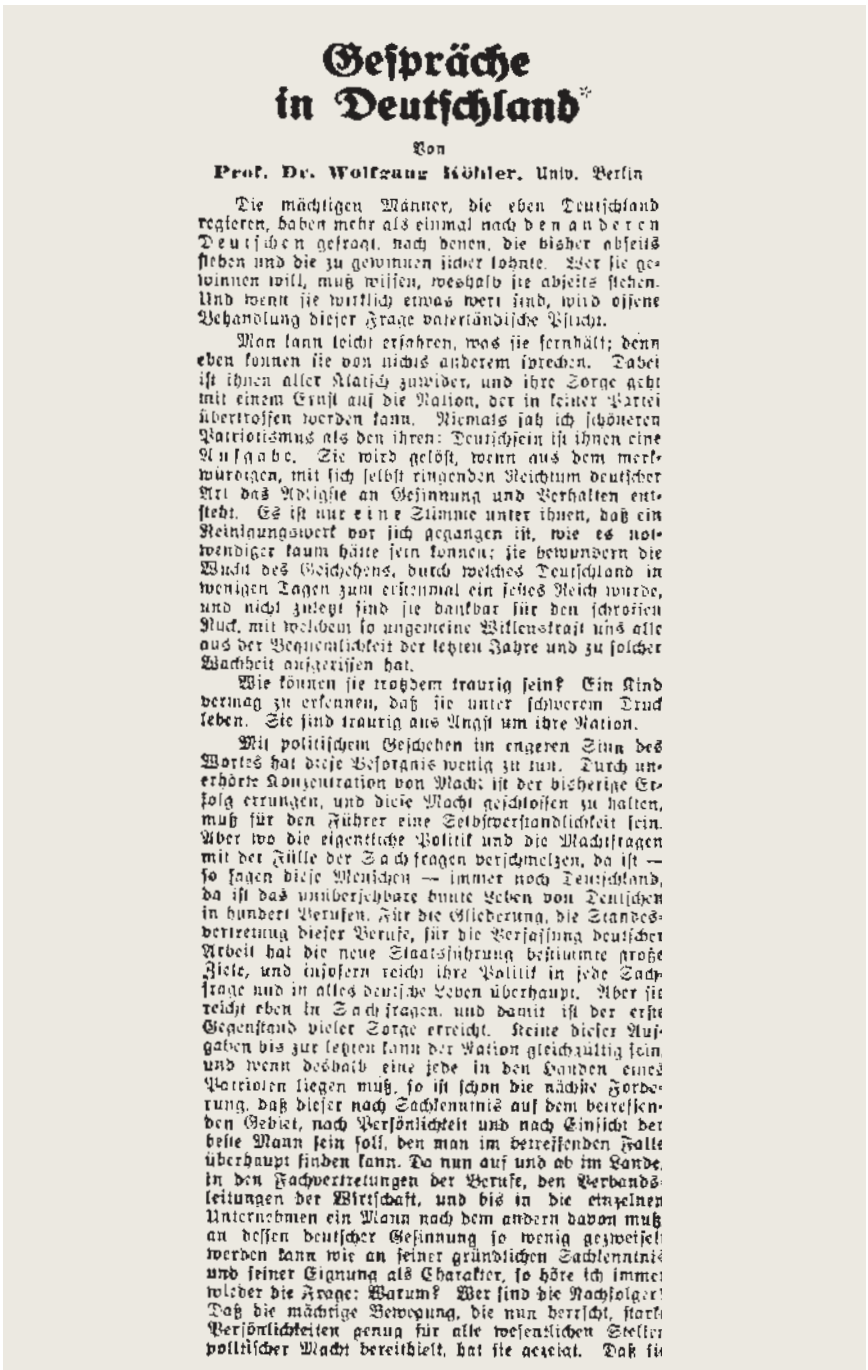
Einer ihrer Hauptvertreter, Max Wertheimer (1880–1943), illustrierte den Beginn der experimentellen Gestaltpsychologie gern mit einer Anekdote, die sich im Jahr 1910 zugetragen haben soll: Wertheimer reiste im Spätsommer jenes Jahres mit dem Zug von Wien ins Rheinland. Während der Fahrt sinnierte er über das Sehen von Bewegungen.

Als ihm der Gedanke kam, er könne solche Wahrnehmungen vielleicht auch mit schnell aufeinanderfolgenden Lichtblitzen, wie sie ein Stroboskop erzeugt, künstlich hervorrufen, stieg Wertheimer kurz entschlossen in Frankfurt aus. Er kaufte ein solches damals als Kinderspielzeug erhältliches Gerät und fing gleich im Hotelzimmer mit den ersten Selbstversuchen an. Wenig später nahm er Kontakt zu dem Psychologieprofessor Friedrich Schumann (1858–1940) von der Frankfurter Handelshochschule (ab 1914 Universität) auf. Dieser schickte seinen Assistenten Wolfgang Köhler (1887–1967) zu Wertheimer ins Hotel. Man kam schnell überein, dass Wertheimer seine Experimente in Schumanns Institutslabor fortsetzen sollte.

Wie viel an dieser Geschichte wahr ist, lässt sich schwer beurteilen. Michael Wertheimer, der Sohn von Max Wertheimer, fand jedenfalls keinen Beleg dafür, dass sein Vater tatsächlich ungeplant in der Mainmetropole aus dem Zug gestiegen war. Vielleicht war es doch eher Absicht, denn der dort lehrende Schumann hatte erst wenige Jahre zuvor ein neuartiges Stroboskop entwickelt, das schon vorher Wertheimers Interesse geweckt haben mochte.

Wie sahen die ersten Versuche der Frankfurter Gestaltforscher nun konkret aus? In einer Testreihe zeigte Wertheimer seinen Probanden in schneller Folge zwei Reize: Bei dem ersten war zum Beispiel auf der linken Seite eines Bilds eine senkrechte Linie zu sehen, bei dem zweiten eine gleich lange, waagerechte Linie rechts unten. Wurden nun die beiden Bilder abwechselnd gezeigt, so entstand ab einem kurzen zeitlichen Abstand von circa 60 Millisekunden der Eindruck einer so genannten Scheinbewegung: Die Versuchspersonen berichteten, die Linie wandere ähnlich einem Scheibenwischer hin und her.

Erfolgte der Bildwechsel noch schneller, wurden die Reize als simultan erlebt – die beiden Linien flackerten anscheinend gleichzeitig auf. Nur wenn die Darbietung eine bestimmte Frequenz nicht überschritt, blieb es bei dem Eindruck von »Sukzessivität«: Man sah mal die eine Linie, mal die andere, jeweils fest an Ort und Stelle. Die bei schnellerer Folge wahrgenommene Bewegungsgestalt bezeichnete Wertheimer als »Phi-Phänomen«.



Gespräche in Deutschland*

Von

Prof. Dr. Wolfgang Köhler, Univ. Berlin

Die mächtigen Männer, die eben Deutschland regieren, haben mehr als einmal nach den anderen Deutschen gefragt, nach denen, die bisher abseits stehen und die zu gewinnen jeder lohnte. Wer sie gewinnen will, muß wissen, weshalb sie abseits stehen. Und wenn sie wirklich etwas wert sind, wird offene Behandlung dieser Frage vaterländische Pflicht.

Man kann leicht erfahren, was sie fernhält; denn eben können sie von nichts anderem sprechen. Dabei ist ihnen aller Klatsch zuwider, und ihre Sorge geht mit einem Ernst auf die Nation, der in keiner Partei übertroffen werden kann. Niemals sah ich schöneren Patriotismus als den ihren: Deutschsein ist ihnen eine Aufgabe. Sie wird gelöst, wenn aus dem merkwürdigen, mit sich selbst ringenden Reichtum deutscher Art das Adligste an Gesinnung und Verhalten entsteht. Es ist nur eine Stimme unter ihnen, daß ein Reinigungswerk vor sich gegangen ist, wie es notwendiger kaum hätte sein können; sie bewundern die Wucht des Geschehens, durch welches Deutschland in wenigen Tagen zum erstenmal ein festes Reich wurde, und nicht zuletzt sind sie dankbar für den schroffen Ruck, mit welchem so ungemeine Willenskraft uns alle aus der Bequemlichkeit der letzten Jahre und zu solcher Wachheit aufgerissen hat.

Wie können sie trotzdem traurig sein? Ein Kind vermag zu erkennen, daß sie unter schwerem Druck leben. Sie sind traurig aus Angst um ihre Nation.

Mit politischem Geschehen im engeren Sinn des Wortes hat diese Besorgnis wenig zu tun. Durch unerhörte Konzentration von Macht ist der bisherige Erfolg errungen, und diese Macht geschlossen zu halten, muß für den Führer eine Selbstverständlichkeit sein. Aber wo die eigentliche Politik und die Machtfragen mit der Fülle der Sachfragen verschmelzen, da ist — so sagen diese Menschen — immer noch Deutschland, da ist das unübersehbare bunte Leben von Deutschen in hundert Berufen. Für die Gliederung, die Standesvertretung dieser Berufe, für die Verfassung deutscher Arbeit hat die neue Staatsführung bestimmte große Ziele, und insofern reicht ihre Politik in jede Sachfrage und in alles deutsche Leben überhaupt. Aber sie reicht eben in Sachfragen, und damit ist der erste Gegenstand vieler Sorge erreicht. Keine dieser Aufgaben bis zur letzten kann der Nation gleichgültig sein, und wenn deshalb eine jede in den Händen eines Patrioten liegen muß, so ist schon die nächste Forderung, daß dieser nach Sachkenntnis auf dem betreffenden Gebiet, nach Persönlichkeit und nach Einsicht der beste Mann sein soll, den man im betreffenden Falle überhaupt finden kann. Da nun auf und ab im Lande, in den Fachvertretungen der Berufe, den Verbandsleitungen der Wirtschaft, und bis in die einzelnen Unternehmen ein Mann nach dem andern davon muß, an dessen deutscher Gesinnung so wenig gezweifelt werden kann wie an seiner gründlichen Sachkenntnis und seiner Eignung als Charakter, so höre ich immer wieder die Frage: Warum? Wer sind die Nachfolger? Daß die mächtige Bewegung, die nun herrscht, starke Persönlichkeiten genug für alle wesentlichen Stellen politischer Macht bereithielt, hat sie gezeigt. Daß sie

Protestbrief eines Mutigen

Wolfgang Köhler war der einzige Hochschullehrer für Psychologie in Deutschland, der öffentlich die Rassengesetze des Naziregimes kritisierte, obwohl er als Nicht-Jude persönlich unbehelligt blieb. Am 28. April 1933 protestierte er in einem offenen Brief in der »Deutschen Allgemeinen Zeitung« gegen die rassistisch und politisch motivierte Verfolgung von Wissenschaftlern. Als der Universitätsbetrieb »gleichgeschaltet« wurde und Köhler viele seiner Assistenten am Berliner Psychologischen Institut entlassen musste, emigrierte auch er 1935 in die USA. Dort lehrte und forschte er lange Jahre am Swarthmore-College in Pennsylvania. Köhler starb am 11. Juni 1967 auf seiner Farm in Enfield, New Hampshire.

MIT FRDL. GEN. VON HELMUT E. LÜCK

Wertheimers Versuche zum Bewegungssehen markieren den Beginn der wohl bekanntesten Schule der Gestaltpsychologie. Zu ihr gehörten neben Wertheimer vor allem der besagte Wolfgang Köhler sowie Kurt Koffka (1886–1941). Sie stellten zunächst in Frankfurt, in den 1920er Jahren dann in Berlin zahlreiche Arbeiten fertig, die nicht nur der Wahrnehmungsforschung, sondern auch der Psychologie insgesamt frische Impulse gaben.

Neu am Ansatz der Frankfurter beziehungsweise Berliner Schule war, dass sie – anders als etwa die Grazer – Gestalten als ganz ursprünglich ansah. Der Mensch »produziere« sie nicht aus irgendwelchen fundamentalen Sinnesdaten, und sie bildeten sich auch nicht bloß parallel zu diesen; Gestalten seien selbst *die* Grundeinheiten des Seelenlebens.

Abschied von alten Dogmen

Von Anfang an vermied es Wertheimer auch, vom Phi-Phänomen als einer Wahrnehmungstäuschung zu sprechen. Er erkannte, dass es für den Beobachter unerheblich war, ob die wahrgenommene Bewegung durch zwei nacheinander erscheinende Reize oder durch eine wirkliche Verschiebung erzeugt wurde. Auch wenn man den Probanden den Effekt erklärte und als »bloß subjektive« Erscheinung entlarvte, verschwand er keineswegs – im Gegenteil: Nach der Aufklärung wurde das Phi-Phänomen oft noch deutlicher wahrgenommen.

Die Gestaltpsychologen entwickelten ein theoretisches Programm, mit dem vor allem Köhler versuchte, alte Dogmen der Sinnesphysiologie zu widerlegen. Hatten deren Vertreter wie Hermann von Helmholtz noch eine relativ feste Eins-zu-eins-Beziehung zwischen dem physikalischen Reiz und dem zugehörigen Sinneseindruck angenommen, so machten die Gestalttheoretiker deutlich, dass dem keineswegs so ist. Doch nicht nur unsere Wahrnehmung, auch Denken und Handeln haben oftmals Gestaltqualität. Dies zeigten kurze Zeit später etwa Wolfgang Köhlers bahnbrechende Untersuchungen an Menschenaffen.

Auf Vorschlag des Berliner Mediziners Max Rothmann richtete die Preußische Akademie der Wissenschaften 1913 eine Af-

fenstation auf der Insel Teneriffa ein. Dort sollten die Fähigkeiten der Tiere unter annähernd natürlichen Lebensbedingungen studiert werden. Angesichts der heftig diskutierten Evolutionslehre Charles Darwins interessierte dabei besonders die Frage, wie ähnlich Affen dem Menschen in ihren geistigen Fähigkeiten sind. Der Berliner Philosoph und Psychologe Carl Stumpf (1848–1936) schlug Köhler als Leiter der Station vor, obwohl dieser damals gerade erst 26 Jahre alt war und kaum über Erfahrungen in Biologie und Tierpsychologie verfügte.

Köhlers Schimpansenversuche sind inzwischen so legendär, dass sie Eingang in populäre Sachbücher und sogar Grundschulfibeln gefunden haben. Sie belegen, dass Schimpansen durchaus in der Lage sind, komplexere Probleme zu lösen: So stapelten die Tiere Kisten aufeinander und benutzten Stöcke, um Bananen von der Käfigdecke zu angeln. Einige besonders ausgefuchste Affen steckten auch zwei unterschiedlich dicke Bambusstöcke ineinander, wenn die begehrte Leckerei außerhalb des Käfigs zu weit entfernt lag.

Was wenig bekannt ist: Schon vor Köhler hatte Leonard T. Hobhouse in England ganz ähnliche Versuche durchgeführt. Köhler ging allerdings systematischer vor, protokollierte sorgfältig alle Ergebnisse und hielt sie zum Teil sogar auf Film fest. Noch entscheidender für seinen Erfolg war jedoch, dass er auch eine überzeugende Erklärung für seine Beobachtungen fand. Auf die richtige Lösung für ein gegebenes Problem zu kommen, erforderte nicht unbedingt ein längeres Ausprobieren nach der Methode »Versuch und Irrtum« – wie etwa der amerikanische Lerntheoretiker Edward Thorndike (1874–1949) geglaubt hatte.

Vielmehr schien bei den Affen der Groschen ganz plötzlich zu fallen. Ziel und Hilfsmittel bildeten dabei eine Gestalt – der Affe musste sich ausgemalt haben, wie er nach den Bananen angeln konnte. Die sich daraus ergebende Erkenntnis nannte Köhler »Einsicht«. Fast zeitgleich mit den Wahrnehmungsstudien Wertheimers, mit dem Köhler von Teneriffa aus in engem Briefkontakt stand, erwies sich auch das einsichtsvolle Handeln als Gestaltphänomen.

Köhler hatte bereits den größten Teil seiner Schimpansenversuche durchgeführt, als im Sommer 1914 der Erste Weltkrieg ausbrach. Obwohl Spanien im Krieg neutral blieb, konnte Köhler die Insel bis 1920 nicht verlassen; zeitweise vermuteten britische Beamte sogar, Köhler sei ein deutscher Spion und die Schimpansenforschung nur ein Vorwand, um auf der Kanarischen Insel einen Landeplatz für deutsche Luftschiffe zu bauen.

Affen für den Berliner Zoo

Der ursprüngliche Plan, die Anthropoidenstation für verschiedene tropische Tierarten auszubauen, zerschlugen sich durch die Nachkriegsinflation. 1920 wurde die Station schließlich aufgelöst – die Affen landeten im Berliner Zoo. Als Köhlers Bericht über seine Schimpansenversuche 1921 in Buchform erschien, fand er damit große öffentliche Beachtung und regte viele Psychologen und Verhaltensforscher zu weiteren Arbeiten an.

Köhler gilt bis heute als der Naturwissenschaftler unter den Gestalttheoretikern. Jahrzehntelang bemühte er sich um den Nachweis, dass nicht nur Wahrnehmung und Denken Gestaltprinzipien folgen, sondern auch die Hirntätigkeit einem ähnlichen Grundsatz gehorcht. Sein Isomorphiepostulat, wonach eine Gestalt auch neuronal auf isomorphen (griechisch für »gleich geformten«) Erregungsmustern beruhe, ist allerdings bis heute umstritten.

1922 wurde Köhler als Nachfolger von Carl Stumpf Direktor des Berliner Psychologischen Instituts. Damit begann die eigentliche Blütezeit der Gestaltpsychologie. Die Zeitschrift »Psychologische Forschung«, von Köhler mitherausgegeben, war deren zentrales Organ. Damals gab es für Psychologen allerdings weder klar geregelte Berufsfelder noch Studiengänge. Die Studenten am Berliner Institut, das im Stadtschloss untergebracht war und über das wohl bestausgestattete psychologische Labor jener Zeit verfügte, studierten Psychologie quasi als Luxusfach.

Weitere wichtige Stätten der gestaltpsychologischen Forschung in Deutschland waren die Universitäten in Gießen, die 1918 Kurt Koffka zum Professor berufen hatte, sowie in Frankfurt, wohin Max Wertheimer 1929 zurückkehrte.

Wertheimer leistete vor allem bedeutende Beiträge zur Denkpsychologie. Sein posthum 1945 (deutsch 1957) erschienenes Buch über produktives Denken –

SCHULE DES SEHENS
Real existierende Stühle gibt es in allen erdenklichen Formen – und doch erkennen wir sie stets als Stuhl, weil wir dieses Konzept früh verinnerlicht haben.

ANATOLY TIPYASHIN / FOTOLIA.DE

heute würden man eher von Kreativität sprechen – dokumentiert den intensiven intellektuellen Austausch, den er mit Albert Einstein vor 1933 in Berlin pflegte. Kurt Koffka hingegen stellte den Nutzen der Gestalttheorie für die Entwicklungspsychologie heraus. So weiß man heute, dass etwa das Lesen ein ganzheitlicher Prozess ist und dass die Stufenfolge von einzelnen Buchstaben über Wörter bis zu ganzen Sätzen der menschlichen Wahrnehmung kaum entspricht.

Koffka emigrierte noch vor der »Machtergreifung« durch die Nazis in die USA, wo er zu einem der eifrigsten Verfechter der Gestaltpsychologie wurde. Nachdem auch Wertheimer und der Psychologe und Philosoph Kurt Lewin (1890–1947) auf Grund der Rassengesetze zur Emigration gezwungen worden waren, folgte ihnen 1935 schließlich auch der »Arier« Wolfgang Köhler. Damit hatte die Gestaltpsychologie in Deutschland ihre führenden Köpfe verloren.

Heftiger Gegenwind

Jenseits des Atlantiks fanden ihre Vertreter eine völlig andere Wissenschaftsszene vor. Waren die Gestaltpsychologen in Deutschland vor allem gegen die Bewusstseinspsychologie in der Tradition Wilhelm Wundts zu Felde zogen, so blies ihnen nun in den USA vor allem von Seiten der Behavioristen ein heftiger Wind entgegen (siehe auch nächster Teil der Serie in Heft 9/2007). Erschwerend kam hinzu, dass die Exilanten zwar an gut ausgestatteten Einrichtungen arbeiten konnten – jedoch an den kleineren Hochschulen oft kein Promotionsrecht hatten. Die Gestaltpsychologie spielte in den USA daher lange keine besondere Rolle.

Auch als es Ende der 1950er Jahre zu einer intensiven Rezeption der amerikanischen Psychologie in Deutschland kam, wurde die Gestaltpsychologie nur zögerlich »reimportiert«. Das Interesse der jungen Generation galt eher jenen Richtungen, die hier zu Lande noch wenig bekannt waren: den vom Behaviorismus geprägten Lerntheorien, der Persönlichkeitsdiagnostik, der experimentellen Sozialpsychologie oder auch der Psychotherapie. Erst die so genannte Kognitive Wende (Heft 10/2007) sorgte dafür, dass

KÖPFE DER GESTALTPSYCHOLOGIE

Ein halbes Jahrhundert lang, von 1890 bis 1940, prägte die Gestalttheorie das psychologische Denken. Von den Nazis ins Exil getrieben, fanden ihre Hauptvertreter in den USA eine neue geistige Heimat.

Erkenntnisse der Gestalt- und Wahrnehmungsforschung wieder verstärkt Einzug in die Psychologie hielten. In der Bundesrepublik trug die Gesellschaft für Gestalttheorie und ihre Anwendungen (GTA) mit ihren Tagungen und der von ihr herausgegebenen Zeitschrift »Gestalt Theory« viel zur Renaissance des gestaltpsychologischen Denkens in Deutschland bei.

Neben den genannten Exponenten gab es in den 1920er Jahren aber noch eine weitere »Gestaltschule«: die so genannte Genetische Ganzheitspsychologie in Leipzig. Felix Krueger (1874–1948), ein ehemaliger Assistent Wundts, war 1910 zu dessen Nachfolger ernannt worden. Er vertrat die Auffassung, selbst Gefühle hätten Gestaltqualitäten im Sinn von Christian von Ehrenfels, denn auch für sie würden dieselben Kriterien gelten. Krueger widersprach damit einerseits der Elementenlehre seines Lehrers Wundt; aber auch an den Experimenten der Berliner Schule kritisierte er die Vernachlässigung des Gefühlsmäßigen.

Heute erscheint die Leipziger Ganzheitspsychologie als methodisch unscharf und in ihren Begriffen eher antiquiert. Auch gerieten die Beiträge von Krueger und seinem Mitarbeiter Friedrich Sander (1889–1971) später in Misskredit, weil sich beide Forscher mit der nationalsozialistischen Ideologie gemein machten, indem sie ihre Ideen auf das »Völkisch-Ganze« übertrugen.

Sander beispielsweise schrieb 1937, dass die »Ausschaltung des parasitisch wuchernden Judentums« ihre »tiefe Berechtigung in diesem Willen zur reinen Gestalt deutschen Wesens« habe. So muss man sich doch sehr wundern, dass Sander und andere Ganzheitspsychologen in der jungen Bundesrepublik schnell wieder Lehrstühle besetzten und noch lange einflussreich blieben.

Die Leipziger Schule wird heute oft als »geisteswissenschaftlich« und nicht em-

SMITH COLLEGE ARCHIVES / KATHERINE E. MCCLELLAN

Kurt Koffka (1886–1941)

INTERFOTO

Wolfgang Köhler (1887–1967)

INTERFOTO

Kurt Lewin (1890–1947)

VIKTOR SARRIS MIT FRDL. GEN.

Max Wertheimer (1880–1943)

pirisch fundiert angesehen. So pauschal ist dies jedoch falsch, denn die Ganzheitspsychologen stellten nicht nur philosophisch-erkenntnistheoretische Überlegungen an, sondern arbeiteten durchaus auch experimentell. Sander etwa untersuchte die Wahrnehmung von nur so kurz präsentierten Bildern, dass diese nicht bewusst zu sehen waren. Steigerte er nach und nach die Darbietungsdauer bis in den Millisekundenbereich, wurden ihm zufolge so genannte »Vor-Gestalten« erkennbar, welche die Probanden zwar nicht genau beschreiben konnten, die bei ihnen aber dennoch Empfindungen auslösten.

Die Leipziger prägten den Begriff der Aktualgenese, womit die stufenweise Ausdifferenzierung und Verfeinerung von Wahrnehmungsinhalten gemeint ist. Die von Sander eingesetzte Methode der Kurzzeitdarbietung mittels Tachistoskopen lebte unter anderem in der Werbewirkungsforschung fort.

Eine andere bedeutende Variante der Gestaltpsychologie sollte ebenfalls nicht vergessen werden: die »Feldtheorie«. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren Feldkräfte bereits aus der Gravitationslehre und der Elektrodynamik bekannt; in den 1920er Jahren strahlte der Feldbegriff von der Physik auch in die Sozialwissenschaften aus. So nahm ihn Kurt Lewin auf, der seinen Ansatz im Lauf der Zeit mehrfach umbenannte: Sprach er anfangs von dynamischer Theorie, dann von topologischer Psychologie oder Vektorpsychologie, so bürgerte sich am Ende der Begriff Feldtheorie ein.

Lewins Kerngedanke ist einfach: Eine Person (P) steht in einem Lebensraum (Lr). In diesem Lebensraum gibt es bestimmte Elemente – Orte, Gegenstände, andere Personen –, die jeweils positiven oder negativen Aufforderungscharakter (auch Valenz genannt) besitzen. Mit anderen Worten: Die Person fühlt sich von ihnen angezogen oder abgestoßen. Manche Bereiche des Lebensraums sind nicht unmittelbar zugänglich und durch Barrieren versperrt – um zu ihnen zu gelangen, müssen beispielsweise Regionen mit negativer Valenz »durchschritten« werden. Auch können zwei Regionen etwa gleich starken Aufforderungscharakter haben und so miteinander konkurrieren. Lewin spricht in diesem Fall von einem Appetenz-Appetenz-Konflikt.

Ähnlich wie in der Psychoanalyse, jedoch mit größerer methodischer Strenge, wollte Lewin Konzepte und Methoden entwickeln, »welche die dem Verhalten zu Grunde liegenden Kräfte behandeln«. Er wird heute nicht nur deshalb zu den Gestaltpsychologen gezählt, weil er engen Kontakt zu dem Kreis um Wertheimer und Köhler pflegte, sondern auch, weil seine Analyse des »psychologischen Feldes« stets bei der Gesamtsituation ansetzte. Die in ihr wirksamen Größen – etwa der Bewegungsfreiraum oder der Grad der Freundlichkeit – sollten Lewin zufolge messbar sein.

Kräftemessen im Feld

Überhaupt lag Lewin die mathematische Beschreibung psychologischer Prozesse sehr am Herzen. Er strebte eine »logisch zwingende« Sprache an, die »allen anderen in der Psychologie bekannten begrifflichen Hilfsmitteln überlegen« sei. Hierzu nutzte er die Topologie. Verhalten definiert er demgemäß als eine Funktion des jeweils gegenwärtigen Felds, in dem verschiedene Kräfte wirken. Die Feldtheorie erwies sich als ein brauchbares Hilfsmittel, um so verschiedene Dinge wie die Verarbeitung von Konflikten, psychologische Gruppenprozesse oder auch die Symptome seelischer Störungen beschreiben und interpretieren zu können.

Über viele Jahre hinweg drehte Kurt Lewin ebenso Dokumentarfilme, in denen er Menschen im »Kraftfeld« ihrer Affekte, Konflikte, Willenshandlungen festhielt. Meist waren die Gefilmten Kinder aus der eigenen Verwandtschaft. In vielen entwicklungspsychologischen Arbeiten nahm Lewin auf seine eigenen Filmaufnahmen Bezug; oft dienten sie ihm als Anschauungsmaterial bei Tagungen und in Vorlesungen. Wenn seine Zuhörer die feldtheoretischen Erörterungen vielleicht auch nicht immer verstanden – mit seinen Aufnahmen von Kindern in Konfliktsituationen machte sich Lewin einen Namen. Der sowjetische Psychologe Alexander Luria brachte ihn sogar mit dem Regisseur Sergeij Eisenstein zusammen, dessen Filmtheorie Lewin beeinflusste.

Die meisten Filme Lewins galten lange Zeit als verschollen. Nachdem ein Teil in den 1970er Jahren an der University of Kansas wiederentdeckt wurde, produzierten wir an der Fernuniversität in Hagen 1984 den Lehrfilm »Kurt Lewin«, durch den diese Dokumente erstmalig wieder verfügbar wurden. Im Herbst 1987 stieß dann Mel van Elteren von der Universität Rotterdam in den Niederlanden auf den verloren geglaubten, einstündigen Tonfilm »Das Kind und die Welt« (1931). Die Restaurierung des historischen Dokuments war erfolgreich; es konnte nach mehr als 50 Jahren wieder gezeigt werden.

Darin sieht man »das scheinbar Bekannteste und Alltäglichste: Kinder, wie wir sie fortwährend um uns herum haben«, so der Psychologe William Stern bei einer Vorführung in Hamburg am 12. Februar 1932. Lewin filmte seine kleinen Probanden unbemerkt, die Tonaufnahmen verstärkten den Eindruck von Natürlichkeit. Indem er Kinder vom Säugling bis zum Hinterhofsteppke auf Zelluloid bannte, schuf er ein einmaliges Filmdokument. Hier gewinnt die menschliche Entwicklung plastische Gestalt.

Heute ist Lewin allerdings weniger für seine Filme bekannt als für bahnbrechende sozialpsychologische Arbeiten über Führungsstile, Gruppenprozesse und Aktionsforschung. Aber mit diesen Themen haben wir das Gebiet der Gestaltpsychologie bereits verlassen.

Helmut E. Lück *ist Professor für Psychologie an der Fernuniversität in Hagen.*

LITERATURTIPPS

Graumann, C.-F.: Psychologie im Nationalsozialismus. Berlin/New York: Springer 1983.

Köhler, W.: Die Aufgabe der Gestaltpsychologie. Berlin: de Gruyter 1971.

Lück, H. E., Miller, R. (Hg.): Illustrierte Geschichte der Psychologie. Weinheim: Beltz 2005.

WEBLINK

http://www.gestalttheory.net

Arbeiten, Fotos und historischer Kalender